原子力……総合科学技術への道

藤家洋一

(社)日本電気協会　新聞部

7,000
OP 9100
450A-RHR-3
RC
OP6200
DN
UP
7,000
BOT OP 10200
RD
5,000
RE
5,000
CRD
270

総合科学技術への道

原子力……

藤家洋一

(社)日本電気協会　新聞部

原子力——総合科学技術への道

【目　次】

第一章　原子力の文明論的考察

第二章　原子力の整合性

第三章　不安のない原子力を求めて

第四章　地方が原子力を見る時代

写真提供　共同通信社　PANA通信社　科学技術庁　日本原子力文化振興財団　動力炉・核燃料開発事業団　日本原子力研究所　日立製作所

第一章

原子力の文明論的考察

1　転換期を迎えた原子力

転換期を迎えた原子力

石油文明の曲がり角

ゴルバチョフの登場はソ連の事情に詳しくない人々にも劇的であった。ペレストロイカ（改革）とグラスノスチ（情報公開）という二つの言葉は世界的にも有名になり、東側に民主化の黎明が訪れたような印象を与えることとなった。このため一九九〇年代を激動の時代と言う人がいる。これを、世界政治の激変に見られる表面的なものの裏に文明の転換、新しい時代への移行が起こっている、と考えるのも考えすぎとは言えないのではなかろうか。ハンガリー動乱（一九五六年）やプラハの春のチェコ動乱（一九六八年）のようにソ連に軍事力で抑え込まれたケースと違い、社会主義国家は、すでに開発途上型の、あるいは未開発型の社会体制に飽き足らず自由な新しいものを求めていた。冷戦構造の崩壊、ゴルバチョフの登場と東西ドイツ統一に始まる東欧のソ連従属体制の崩壊、次いで一年後のソ連自体の崩壊と、目を奪われる急変の中で事は進んだ。



写真1　ブランデンブルグ門の前で東西ドイツ統一を祝うドイツ市民

事の起こりは、東欧の優等生と言われた東ドイツの市民が近隣国のハンガリーに旅行し、帰国しようとしなかったことにある。ハンガリー政府がこの状況の中で事態の重要性を考え、新しい時代への幕開けとも言えるオーストリアへの検問所を開放したことから激変が始まった。この波はあっと言う間に広がり、ベルリンの壁の崩壊へとつながっていった。東西ベルリンを分ける象徴としてのブランデンブルグ門に集まったドイツ人の数と熱気はテレビを通しても伝えられた（写真1）。当然、西ドイツは千載一遇のチャンスとばかり、一気に東ドイツを吸収し国家統一に進んだ。

かつて西ベルリンに住み、ベルリン

の壁の存在に威圧感を持った者として、この壁の持つ意味を考えたものだった。これだけのもので世界が東西に分離されることの象徴的意味と同時に、現実に物理的障壁の意味もあった。東西の交流は乏しく、西から東へ旅行者は移動できても東の人が西に来ることはなく、後に六〇歳以上の人には許されたが、チェックポイントチャーリーは世界最大の一方通行路と言われていた。この頃、この壁を乗り越えて西側に逃亡する人々の動勢と安否が新聞の中に一定の場所を占めていた。四半世紀以上も前から東西の豊かさの差は歴然としており、壁では隔離されていても、テレビやラジオのような電波は当然のことながら西側から東側へ壁を乗り越えて流れていた。

統一後のドイツは歴然とした東西の格差に悩むこととなった。事実、旧東ドイツの産業技術は大きく遅れをとっており、経済的に旧西ドイツと競合できる状態になく、その後ドイツは厳しい経済状態になり宇宙開発や原子力開発に代表される大型研究開発予算等も影響を受けることとなった。完全復活にはまだしばらくの年月を必要とすることだろう。

米ソ二大超大国を中心とした東西対立の冷戦構造の一方が崩壊したことの因果関係は必ずしもすべて明確にされているわけではなく、自由競争の有無が生んだ経済繁栄の著しい差、核兵器開発による経済的疲幣、政治体制の中で自由が確保されたか否か等がその理由として言われている。東側ではエネルギー源としての化石燃料と原子力発電の供給はソ連が主にまかなって

きた。事実、ソ連からの送電網は東欧にもめぐらされており、ガスのパイプラインも、友情のパイプラインの名で東欧の国々につながっていた。また、発電用の原子炉もソ連製のもので、ソ連の中ではチェルノブイリ炉と同種の黒鉛減速型やソ連型軽水炉が、東欧ではプルトニウム生産に結びつきにくいソ連型軽水炉が建設運転されてきた。しかし、ソ連の石油生産量の急減やチェルノブイリ事故後の原子力発電所建設への批判の高まり等、従来通りの構造を維持することが難しくなった。東欧の国々に比べて、ソ連邦を構成していたＣＩＳ諸国の情勢は更にロシアに直接つながっていた。

いずれにしろ、文明を支えるエネルギー供給に問題が生じてきた。これらの国々が独立後、深刻な状況の中でどのように対応しているかを見ると、独立国家としての多くの苦悩があると同時に、これまでの分割統治的性格の中では当然のことながら植民地支配的構造も見られ、各国とも独自に完結した産業基盤を持ち得なかった宿命を背負わされている。資源を持つことと、これを使用できる技術を持つことが別物であること等、いわゆる南北問題が旧ソ連圏内の各独立国に存在していることを示している。また、軍事面での核開発にしてもカザフスタン共和国のセミパラチンスクで行われた数百回にも及ぶ地上、地下実験の内容はカザフスタン共和国の国民はもちろん、関係者にもほとんど知らされておらず、手探り状態の中で旧ソ連の残したこの大きな負の遺産に対処しようとしている。ウクライナや白ロシアも核について類似の負の遺産に対応させられている。

旧ソ連や東欧の国々に限らず、アジアや南米の国々の都会を訪ねて実感する共通した印象は、環境汚染、特に大気汚染の厳しいことである。これらの国々が石油文明の利点を満喫する以前にこのような状態を迎えたことは技術的、経済的問題が大きかったとはいえ、残念なことであろう。しかし、これら開発途上の国々の現状は考えようによっては過去に日本も経験し、公害対策の中で処理し、克服してきたことであり、直接炭酸ガス問題までに至らず、硫黄酸化物、窒素酸化物等に起因するものであるから技術力によって克服できると考えられるかもしれない。このための技術提供は日本の国際貢献なのかもしれないし、環境保全の点からも重要であろう。

先進国については、脱石油文明はすでに以前からローマクラブ等の指摘を契機に進められているが、石油から天然ガスへのエネルギー資源の移行だけでこれに対処することは基本的には広い意味での石油文明の中での対応であり、未だ明確に次なるものへの移行を探し出していることにはならないと思える。

石油文明の曲がり角が、排出側での制約すなわち基本的な炭酸ガス問題から来たことを契機に、前兆事象としてこれを捉え、二一世紀での脱石油文明を図り、新しい文明の創造へ向けてすでに時代は動いていることを認識すべき時期ではなかろうか。

二一世紀最後の一〇年における時代認識の中での判断は重要である。

石油は正に人類の文明を根幹で支えてきたものであるが、曲がり角に来ていると考えることに大きな異論はなかろう。さて、新しい文明の創造へ向けて原子力はどのような経過をたどっ

てきているであろうか。

創成期の原子力開発

原子力の平和利用は一九五三年一二月に行われた国連総会におけるアメリカ大統領の演説に端を発する（写真2）。アイゼンハワー大統領は「平和のための原子力」（Atoms for Peace、注I-1）のキャッチフレーズで平和利用を説いた。アメリカの軍事目的での核の独占が崩れたことを認識しての提言であった。その後の第一回ジュネーブ会議から原子力の夢と可能性の探求が始まったと言えよう。

自由主義社会のリーダーとしての自負を持つアメリカが世界の原子力開発に果たした貢献は計り知れないものがある。世界の原子力発電の主流である軽水炉は、アメリカで最初潜水艦の動力源として開発されたものを陸上炉として大型化し、ウェスチングハウス（WH）社が加圧水型（PWR）、ゼネラルエレクトリック（GE）社が沸騰水型（BWR）を実用化した。また、アメリカのアルゴンヌ国立研究所では原子炉学校を開校して世界の国々から一流の科学者、技術者を招いて教育した。その後、この人々が各国の原子力界の主要な位置に付き、その国の原子力開発を主導しているのも注目すべきことであろう。

原子力技術の開放、原子力の専門家教育等日本の原子力界もその草創期から多くのことをアメリカに依存し、大きな恩恵を受けてきたことは忘れられないことである。

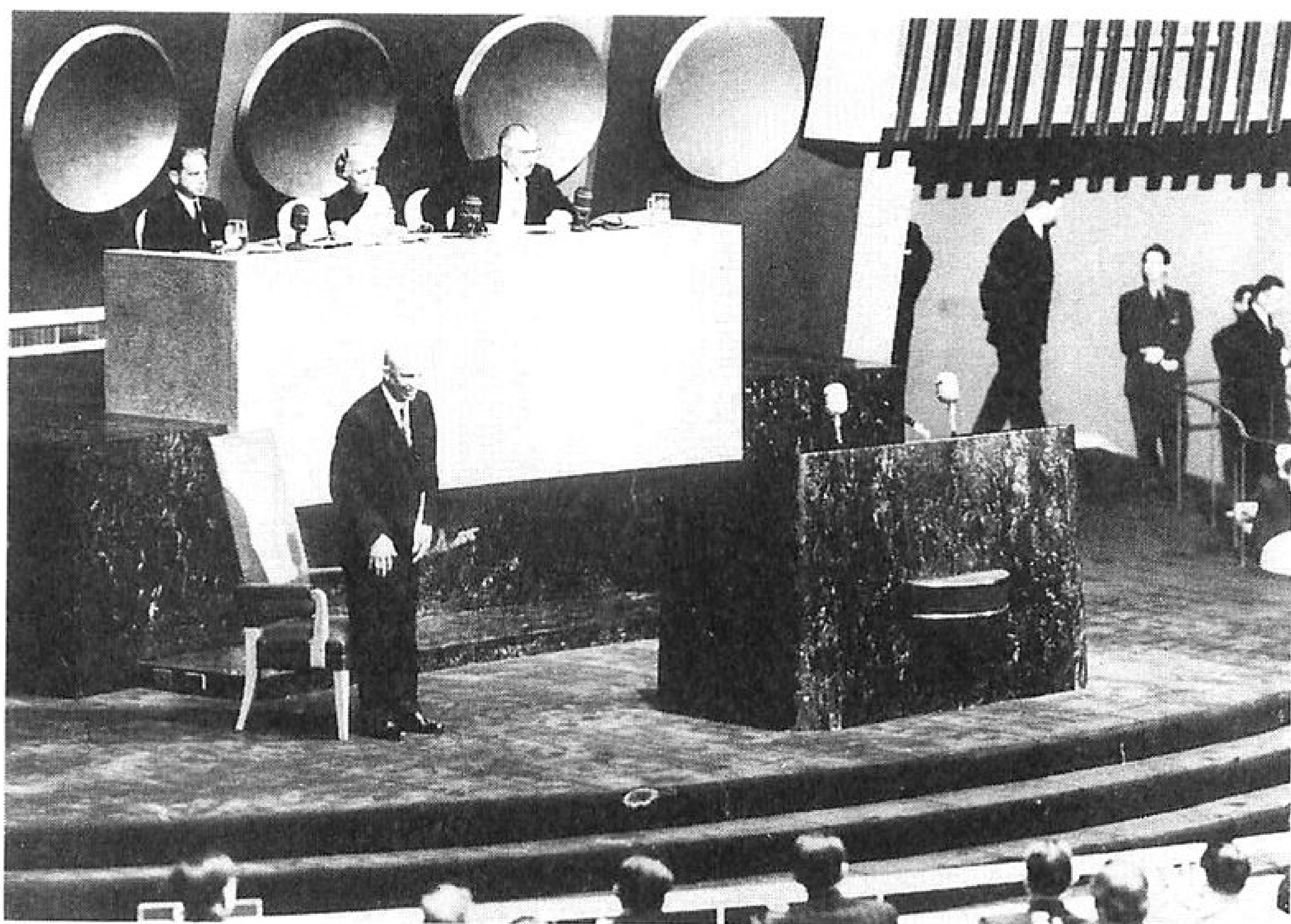


写真２　国連総会であいさつするアイゼンハワー米大統領

現在のアメリカの原子力に対する姿勢は、当時を知る者に昔日の俤いずこの感慨を与えているに違いない。その長期的視点を描くことなく、また研究開発に広がりを示すこともなくプルトニウム問題を中心に短期的に政治的、経済的側面からの議論が行われている。近い将来、再び原子力と人類社会および自然環境との関連についての活発な議論がアメリカで復活することを期待したい。

当時、原子力は新しい時代をつくる魅力を持つものとして多くの人々の興味と関心を引いた。日本でもその当初から関心は深かったが、原子核研究と原子力開発を区別して理解しようとする勢力もあり、前者を善、後者を悪と分別するもの

であった。これはどちらかと言うと、原子爆弾の被害から原子力をその一つの特徴であるエネルギー源として利用することが放射能の存在のために不可能と考え、原子核研究を科学の観点からのみ認めエネルギー開発を拒否しようとする、見方によれば十分成熟しない議論の中で原子力開発が否定されかけたこともあった。幸い学術会議の慎重な議論の中で、原子力の持つ多くの夢と可能性の中の一部を最初から否定してかかるという態度をとらないことが決定されたと聞く。その後は日本の独立のためにはエネルギー源の確保、しかも技術制約のエネルギーの確保は、技術立国として、また福祉国家としての長期展望を持つ日本にとっては重要だとの認識から原子力開発は国の基本政策として認められ、日本民族の資質や、風土的特徴に合った原子力政策がとられてきた。

しかし、この戦後半世紀を通じての日本民族の努力は、日本の人々の気持ちを一九五〇年代に望んだ物質文明の充実から更に進んで生活の安定の中で文化、特に精神文化まで含めた福祉国家への願望へと変質させるとともに、公害問題の発生から環境保全に対する関心が深まり、環境保全は一種の聖域化の様子さえ示している。このため、原子力も他の科学技術と同様、テーゼを中心に語る時代から、その持つネガティブな側面を中心にしたアンチテーゼの世界がよりクローズアップされる段階へ入り、アンチテーゼがむしろ社会的関心を引き付けているようにも思われる。

これは明らかにこれまでの原子力開発の中でエネルギー開発の側面がより強調されてきたた

め、人口・エネルギー・環境のトリレンマの中で原子力のエネルギー源としての資質が問われていることである。これを時代の大きな流れの中での原子力の転換期として位置付ける認識が必要であろう。

原子力開発の「正論」

原子力の光と影

物事には光と影が並存すると言われる。原子力についても同様である。しかし、影が単独で存在することはなく、光があって初めて影が生ずるのであろう。同一の対象物でも光の部分を見るか影の部分を見るかで全く別物と映ることがある。近年、社会のみならず原子力関係者も原子力については光の部分よりも影の部分に焦点を合わせてきたように思える。二一世紀を目前に原子力の転換期を迎えた今、再び光の部分、輝きの部分に焦点を合わせて見るのも十分意味のあることではないだろうか。また、これまで社会的に原子力の影の部分と受け止められてきたものが果たして影であったのか、あるいはいつまでも影であり続けるのかも考えてみるべきである。

人類が原子力の研究開発に手を染めて半世紀が過ぎた。現在を山登りに例えれば麓を離れ山

頂を目指して歩き始め、やっと一合目にたどり着いたかどうかである（図1）。その間、原子力には二度光が射したことがある。最初はシカゴ・パイル1号（CP―1、注I-2）による連鎖反応の実現で、原子力に夢と希望があふれていた百花撩乱（りょうらん）の時期である。この時期は原子核反応、放射線、原子力について多くの可能性が提案されたサイエンス中心の原子力の時代と言える。しかし、せっかく解放された核エネルギーは最初に原爆として軍事目的に使われ、永い将来にわたる影を生み出した。この影は冷戦構造の崩壊により薄くなりつつあっても未だ消えたわけではない。

次の光はアイゼンハワー大統領の「平和のための原子力」である。この宣言は世界に計り知れぬインパクトを与え、原子力の特徴であるエネルギーと放射線の利用を中心とした研究開発が先進国中心に始められた。そして四〇余年が経過した。

山頂へ向けての一合目にあって下を見るとわれわれの先人が切り拓いてきた道が見える。社会からは軽水炉による原子力発電の実用化への道筋が見えていよう。五〇年前の夢と可能性のうち、この道だけが際立って見えている。もっと詳しく見れば他にも放射線の利用等のいくつかの小道がある。それらは途中で停滞しているか、あるいはすでに社会のいくつかの分野で応用されているものもあるが社会はこれを十分認識していないように思える。

原子力の平和利用に参画した多くの概念の中で原子力発電が際立った進展を示し、軽水炉が

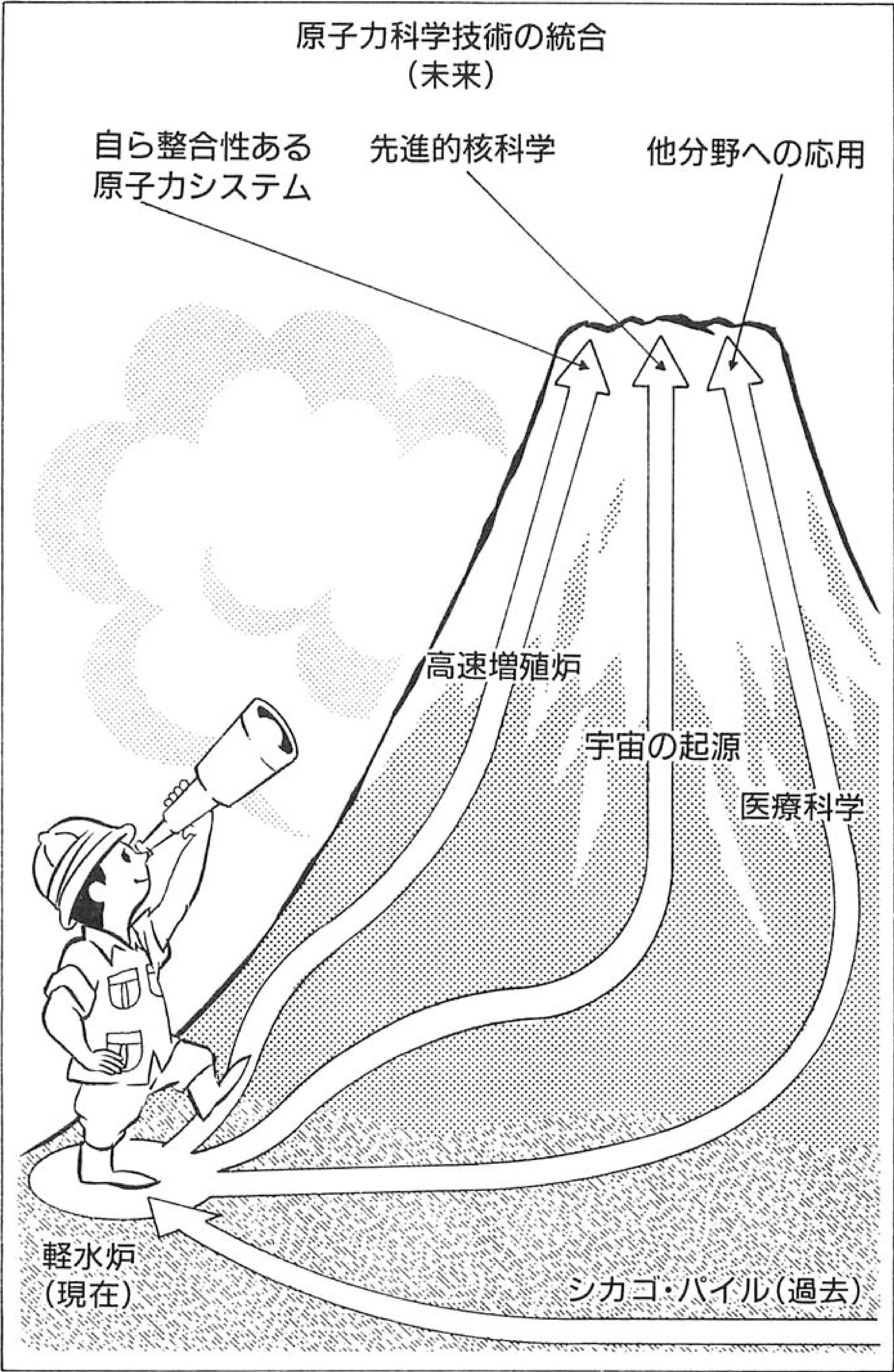


図１　原子力科学技術の統合

現実に発電用原子炉として実用化されたのは理由のあることである。（注Ｉ-3）

開発を進め実用化を早期に効率的に行うには、専門領域を分化し、各領域に人材を割り振って専門家を育成することである。しかし分野の細分化は全体に対する展望を失わせ、研究開発の活力を失っていく側面を併せ持っている。このような状況の中で社会は原子力開発が軽水炉の実用化で完成し、もはや先端領域でない既成の領域すなわちポスト・モダーンの領域に入ったものと理解しているようにさえ思える。その先に新しい発展があることを予見せず、安全性、放射性廃棄物、廃炉、核拡散といったような影のように見える部分に焦点をあて、国際政治、経済性、社会性および環境適合性の観点からアンチテーゼ先行型の議論をしているように見える。

選択すべき道

このような傾向を反映してか先進国に原子力に対してモラトリアムの姿勢を示す国々が現れてきた。イタリア、スウェーデン、オランダ等である。

さて、ここで一部ヨーロッパ先進国で続いているモラトリアムを受け入れて日本も原子力開発を中止し、麓へ下ることも選択の一つである。しかし、二一世紀の人類の平和と豊かさを求める者にとって、その選択は決して許されるものではなかろう。次にモラトリアムとは言わないまでも、一合目に安住して軽水炉中心の原子力発電に頼ることもまた一つの選択である。ア

メリカやドイツの姿勢がこれに当てはまり、原子力の開発に積極的に取り組まないまでもある程度の研究開発は保持しつつ、原子力発電の現在のレベルは保っていると言える。しかし、このような姿勢はいずれにしろ近い将来変更を余儀無くされよう。

確かにこれまで原子力の中心であった軽水炉は二〇世紀に現れ、実用化された技術の中でも優れたものであり、その安全の実績は「軽水炉並みの安全を目指せ」という言葉があるほど原子力関係者に安全に関する影を消すことができるという自信と将来へ向けての勇気を与えてくれるものである。その意味で軽水炉による原子力発電が二一世紀にも続けられることはまず間違いがないと考えられる。更にアジアの国々や世界の開発意欲を見せる国々で今後相当量の原子力発電が行われると予想される。

しかし、軽水炉による原子力エネルギーの利用は資源的に見て石油と同程度の量しか期待できない。更に燃料サイクルについても完結したものにはなり得ない。従っていつまでもここに安住することはできず、原子力はその能力を十分発揮できないままでわずかにエネルギーを供給しながら終末に向かうことになろう。

第三の選択は、たとえ険しくてもこれまでの実績を生かしながら、決断して山頂へ向かうことである。山頂は雲間に見え隠れしていて、そこへの道程は必ずしも現在明らかにされていないが、恐らくそこには原子力が総合科学技術として成長しており、それに根差した新しい人類文明の地平が開けていると思われる。ここで重要なのは、原子力の研究開発の基本哲学と戦略

であり、原子力を総体として捉える冷静な眼であろう。山頂に至る幾筋かの道を決定し、研究開発の方向と手段を見出すためには原子力が基本的に持っている特徴についての認識と人類社会との接点を明らかにしておくことが必要である。原子力は総合科学技術として成長すべき多くの夢と可能性を秘めている。夢と可能性に対する展開は若者をひきつけることになろう。そして、ひいてはそれが社会の理解を深めることにもなるだろう。

原子力開発のテーゼ

今、再びテーゼとしての原子力開発を整理し提言する時期が来ている。これには夢と可能性への挑戦としての観点から、原子力の全貌とその研究開発の枠組みを明確にし、「正論としての原子力開発」を提示することが望ましい。

原子力の研究開発の第一のステップはその長期展望を明らかにすることである。長期とは時代を超えた本質的なものであり、原子力固有の特性に根差したものでなければならない。原子力に関係する人々はロマンチックであり、夢見る人であることが一方で求められ、時代を超えた未来の科学技術の姿を予見しておかなければならない。同時に、一方で現代の政治、経済、社会を十分認識し、洞察する能力と勇気があって初めて解決すべき課題を同定することができる。原子力は、人類社会に貢献できる可能性を多く秘めている。このため特定の技術についてあれこれ細かい議論を展開する前に、長期展望のための広い視野が必要になる。

原子力には将来に確立すべき三つの分野がある。もちろんその第一はエネルギー源としての原子力であることは論を待たない。

人類のエネルギー源は本質的に二つのオプションがある。自然の原子力としての太陽と、人工の原子力としての核分裂と核融合とである。人工の原子力エネルギーの開発に今後は自らの整合性が求められることになるであろう。整合性の要件は次の四項目になる。

・汎用性のあるエネルギーの高性能、高効率利用
・長期にわたるエネルギー源の確保
・放射性物質の核変換と消滅
・安全の確保

この四つの要件を同時に満足する原子力システムのことを「自ら整合性ある原子力システム」と定義すると、「自ら整合性ある原子力システム」にはどうしても高速中性子が重要な役割を演じることになる。この点から言えば高速増殖炉は「自ら整合性ある原子力システム」構築へ向けてのアプローチ線上にある原子炉と考えることができる。原子力エネルギー開発の長期展望には必然的にプルトニウム問題が含まれる。プルトニウムは燃料サイクルを代表するもので長期にわたる資源となる可能性を十分持っている。人類はプルトニウムオプションを放棄すべきではない。核拡散に対する非難のすべてをプルトニウムだけに負わせるのは間違いであろう。

また、超ウラン元素（ＴＲＵ、注Ⅰ-4）の非放射化ないしは消滅に関する技術はプルトニウム

技術と基盤を同じくすることを理解しておくべきである。

第二は原子力の持つ先端的科学性を基礎としてそれに固有の情報と方法を人類社会にもたらすことである。現在、人類は原子力発電の実用化に成功しただけで他の多くの分野は科学的検証の段階か技術開発の段階にある。先端科学技術としての原子力を二一世紀の人類社会に貢献できるものとするために次のような分野の発展が期待される。

・ビッグ・バン宇宙、元素創成の解明
・原子や原子核のレベルでの研究開発（先端核科学）
・医学、バイオ領域への発展（放射線応用）
・科学から工学への橋渡しとしての基盤技術
・原子力技術の革新を目指した基盤技術

第三は、原子力から他領域への展開であり、各領域で開発、改善された科学技術を相互に反映し合うことで、このことによって原子力の科学技術としての総合化が図れることになる。このようにして原子力は熟成し、自然に社会に容認されることになるであろう。原子力総合化のためには、

・他領域の科学技術の進展を原子力に取り入れる

・原子力の領域で独自の研究開発を進める
・原子力科学技術の成果を他領域へ応用する

の考え方が重要となる。

以上第一から第三までの三つの分野の研究開発が山頂へ向けての主たる道になる。これらは互いに協力し、影響を与え合いながら次第に融合していき、山頂に至って総合科学技術になる。この総合科学技術はもはや原子力という名を必要とせず、人類社会をそして人類文明をその根幹で支え、地球環境とも調和のとれた総合科学技術として社会に容認され定着していくことになろう。

文明を支える原子力

人類文明を支える要素

人類は地球上に出現して以来、長い年月をかけて文明を構築してきた。この過程で文明を進化させ、発展を支えてきたのが科学技術であり、その基本にエネルギー利用があった。科学技術はその利用にあたってエネルギーを要求した。また、エネルギーとは直接関連しない社会の分野にも科学技術はその根幹において貢献した。これは物質の利用に関する側面であった。

「エネルギーと物質」。本来は同質なこの二つの存在は、例えばエネルギーと食糧のように社会的には別物と考えられ、文明を支える基本的なものとなっている。最近はエネルギーと物質に情報が加わって三者の相互関連の中に文明が構築されているように思える。（図2）

エネルギーおよび物質の流れや変換を行う機能の集合をシステムと呼んでおり、機能相互を制御し、発揮させるためにも情報が必要である。現代文明にあってはシステムが人々の日常性を超えて巨大かつ複雑になることがあり、巨大科学技術を生み出してきた。

原子力システムが社会に対して理解され、受容されるためには自らの情報発信が重要であることは論を待たないが、同時に二一世紀社会および地球環境が総合科学技術としての原子力に何を求めているかについての情報も常に受け入れ、これと調和させていくことが求められている。

情報に関して更に重要なことは、未知の世界からの情報である。原子力が宇宙の根源に深く関わっていることから、その特性を生かした手法や方法論により、宇宙の起源、元素の創成あるいは生命の起源等、人類の夢と願望を満たす情報を社会にもたらすことはサイエンスとしての原子力の進む方向でもある。このように二一世紀以降の人類の平和と豊かさを確保するためには、原子力を文明論の観点から十分吟味するとともに、石油文明とある時期は共存し、あるいは次第にこれに代わる総合科学技術として社会と融和し、社会に定着する可能性と実現性を展望しておくことが必要であろう。

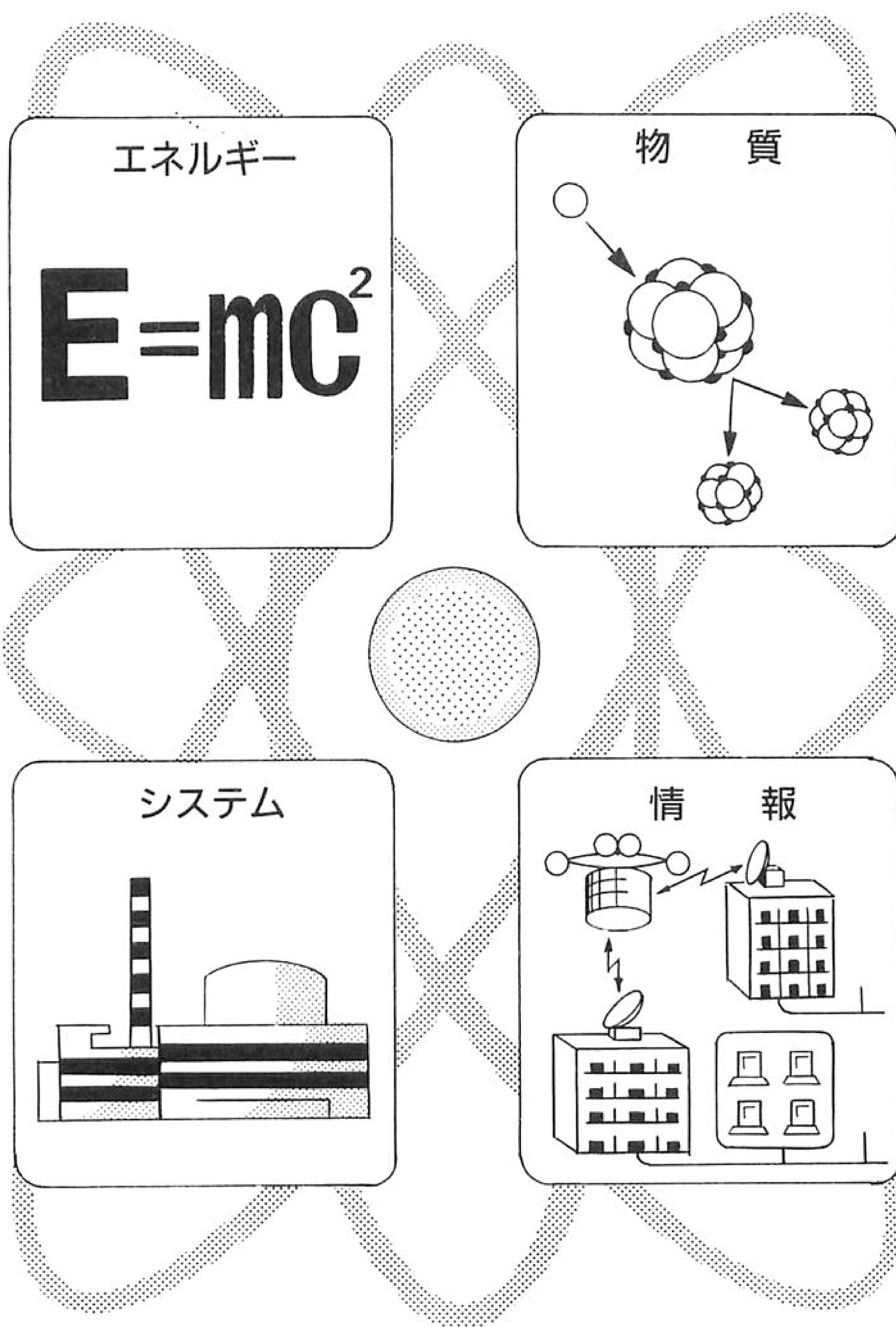


図 2　人類文明を支える要素

石油文明と共存、あるいは石油文明に代わる原子力文明、これは考え方によっては当然のことを言っているにすぎない。

われわれは、現在石油文明の中に生きている。確かに現代文明を支配しているのは原子や分子の結びつき方によって授受される化学エネルギー、すなわち化学反応によって解放されるエネルギーであると言って差し支えない。しかもわれわれが石油文明と言った場合、単にエネルギー源だけを指すのではなく、現代の物質文明のすみずみまで行きわたっている石油製品や人類社会を支えている科学技術を同時に指していることに気が付くだろう。

われわれは、このような石油文明を肯定的な目で見ておく必要があろう。石油文明の出発点から現在に至るまでの間、人類社会との調和の観点から見れば否定的要素ももちろんあり、公害問題等に苦しむことがあったり、軍事利用も当然あったが、人類社会との調和を図ってきたからこそ人類は石油文明それ自体を総体として受け止め、受け入れてきたと言えよう。

石油文明の将来については、従来埋蔵量を中心に資源論的観点から論ぜられてきたところであるが、二〇世紀後半になっての人口、エネルギー、環境のトリレンマ（図3）の中で資源論に加えて、化石燃料の使用によって必然的に排出される炭酸ガスによる温室効果がもたらす地球温暖化の環境問題がクローズアップされ、排出側に対する制約が加わってきた。

石油文明が人類社会を支えるものとしてその限界と局部的破綻（はたん）を見せ始めるに及んで、二一世紀以降に大きな期待が持てないと考えられるようになった。このような状況と将来展望の中

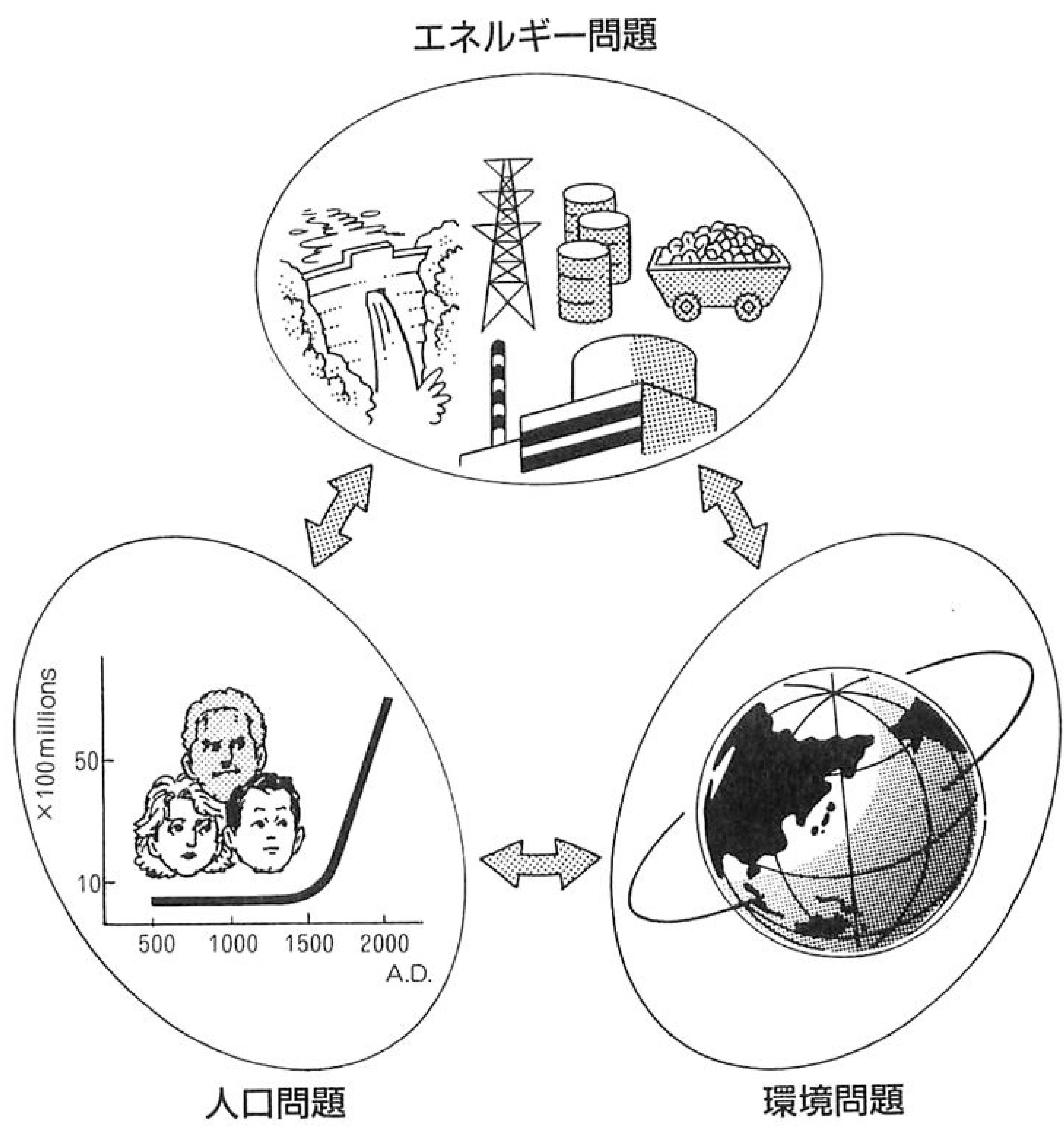


図３　トリレンマ：３つの課題

で、石油文明の破綻を究極的に突きつけられて新しい文明にいやいや移行するよりは、まだ余裕のある間に新しい文明への展望を拓き、その道筋を定め、古いものとの間にスムーズな引き継ぎを行うことを心掛けておくことが、当然のことながら望ましいと言えよう。

石油文明との共存

石油文明と共存、あるいは漸進的に置換できる可能性を持つものに太陽光を中心にしたものと原子力を中心にしたものとがある。太陽光線が太陽で生ずる自然の原子力によるエネルギーの供給であることを考えれば、自然の原子力と人工の原子力が次の文明を支える可能性を持つことになり、宇宙のエネルギーの源が原子力であることを考えると、より根源的なところを新しい文明構築の原点に置くことになる。新しい文明となるには少なくとも石油代替ができることであろうし、更に将来の人類社会に平和と豊かさをもたらす可能性を持ったものでなければならない。

石油文明の出発点は地球での植物の光合成である。石油等は一次エネルギーと言われるが、これは地上で太陽の光を植物が固定して貯蔵性のあるエネルギーにしたもので、もとは太陽の中で原子力によって生み出されたものである。この点から見れば、地球上で核分裂や核融合反応によって解放されるエネルギーを、植物に代わって化学エネルギーに変換することができれば人工的に核エネルギーから化学エネルギーへの変換ができることになり、原子力が石油に代

わって文明の担い手になる最低限の条件は達成できる。すなわち、太陽と植物の共同作業が地上で原子力によって再現されることになる。しかし、トリレンマの中では環境保全の立場から炭酸ガスの発生を抑制するため、炭素をこのエネルギー循環の中に入れることを避けるべきだとすれば、炭化水素に代わって水の分解により得られる水素エネルギーが石油代替エネルギーとして認知されることになろう。これは例えば高温ガス炉（注Ⅰ-5）の熱エネルギーによって水の分解を行うこと等が考えられる。

このように、植物がこれまで果たしてきた役割を科学技術によって置き換えることで第一段階の石油文明代替へのアプローチは可能であるが、その際人類社会での使用の仕方については人類社会、自然環境との接点を考え、調和を図ることが必要である。この観点に立つと一般社会の太陽エネルギーに対する期待が大きいことは十分理解できるところであるが、太陽エネルギーの持つ本質的特徴としての非定常性は、これを植物に代わって固定する技術が開発されることでかなり解決されるであろうが、人類文明がたどってきた都市の形成と人口の集中に対しては太陽エネルギーの持つ分散的性質と低密度の宿命が解決を容易でなくしている。

原子核に潜むエネルギーの解放と制御

原子力開発はこれまで半世紀の歴史を持つ。これまで主として原子力はその特徴を活かしたエネルギー開発の面から論ぜられ、エネルギー需給構造の中での議論が多い。しかし、二一世

紀を目前にし、その研究開発にエネルギー利用の観点を脱却した発想の転換が求められている。それは人類文明との関わりであり、自然界との調和である。

日本が明治以来とってきた科学技術の開発路線を踏襲するなら、現実重視の発想に立って現実の課題を背伸びせずに、着実に一つずつ解決する中で次第にあるべき姿を明確にしていくという、下からの積み上げとも言うべきボトムアップ的思考方法がある。真面目に努力すれば結果が開けると考える姿勢であり、改良主義の姿勢である。しかし、この研究開発姿勢では原子力の持つ夢と可能性を包括的に捉えた議論が必ずしも展開できず、将来のあるべき姿に近づけるかどうかは自明ではない。

原子力開発を長期的に捉える視点に立てば、積み上げ方式で個別的特徴を摘出し、それを総合するものではなく、むしろ大きな包括的命題から出発するトップ・ダウン的思考方法をとることが望ましい。原子力開発を長期に展望するに当たっては、この包括的命題を設定するのが妥当である。

原子力の研究開発の究極的命題を端的に表現すれば「原子核に潜むエネルギーの解放と制御」となる。原子力は「放射線と原子核の反応をベースとした科学技術」であり、これを人類文明を支える総合科学技術として発展させていくことが今後の課題である。

二〇世紀は原子の構造の理解とそこに潜むエネルギーの制御と利用の上で大きく進展した。原子核エネルギーの有効利用の面でも軽水炉の実用化でその一歩を踏み出したのを受けて、二

一世紀以降の人類の挑戦は原子核に潜むエネルギーのより積極的な解放と制御へ向けたものになり、そこに人類の情熱が注がれるものと考えられる。

原子力はこのように原子核の内部という自然のより深い部分から出発して宇宙の大きさにまで至るスケールの大きな話であり、この半世紀にわたる研究開発の経験に照らしても先に述べたような巨大さを宿命的に持つことになる。このような特徴を持つため、国が原子力開発に対する姿勢を明確にして国の政策として取り組むことが最低限必要となろう。従って、原子力の本質的特徴に根ざした長期展望を明確にすることがまず第一に求められる。その中でこれが自然環境、社会環境とどのように調和できるものかを考えておく必要がある。

利用から調和へ

利用から調和へ

原子力はこれまでのエネルギー開発にとどまらず二一世紀以降の平和で豊かな人類社会をその根幹で支える総合科学技術として受け止めておくことが重要である。従って原子力は人類社会および地球環境と調和して存在することが求められ、原子力の開発には整合性が必要となり、「利用から調和へ」の発想の転換が現在求められている（図４）。原子力の幅の広さと奥行きの

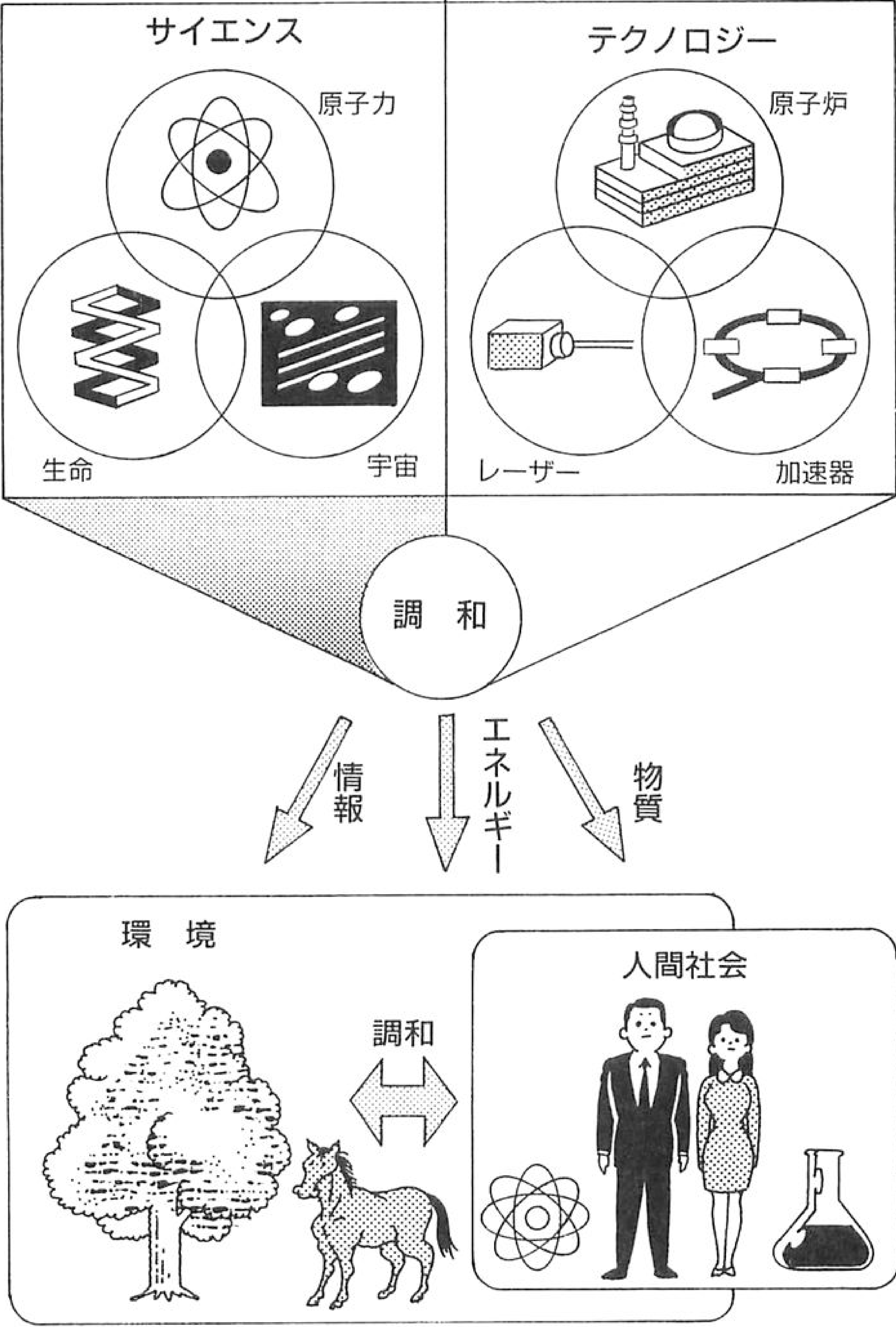


図４　利用から調和へ

深さを考えると、原子力が人類文明をその根幹で支える科学技術に成長するためには自然や社会との間に持つ接点や相互関係は決して無視できないことは容易に理解されるし、事実これまでの半世紀にわたる原子力開発は自然や社会との間に多くの接点を持ってきた。

自然環境との調和について言えば、従来の科学技術がともすれば特徴の利用に焦点があり、それが自然環境に与える影響を当初から考慮し、適切に対応する姿勢に欠けていたのに対し、今後の科学技術の研究開発にあたっては自然環境との調和が利用に比べてより高位の理念になることから、自然環境との調和の観点は長期展望の中に組み込むのが妥当と言えよう。

社会環境との調和について言えば、総合科学技術としての原子力はその時代の政治、経済、社会との接点も大きく、お互いに深く関わり合い、強く影響しあっている。従って原子力開発にあたっては時代を超えた長期的展望と同時にその置かれた時代の政治・経済・社会に対する状況認識を行い、当面する課題を摘出し、開発の柔軟性の中に現実的方策を模索することが重要である。

政治と原子力の関係では第一に世界政治における核兵器の問題であり、その代表がプルトニウムである。現状では望めぬ話ではあるが、世界が原子力を平和利用に限ることを決定し、これに反する動きがなければ世界政治における核問題はなくなり、原子力開発はぐっと明るさを増すことになろう。しかし現実は核の緊張は基本的には緩和傾向にありながらも一国の原子力政策にまだ大きな影響を与えている。一方、国内政治においては原子力政策に関する意思決定の

あり方とその具体的遂行に関する国民的合意形成への努力が求められている。

経済と原子力の関係について言えば、原子力に限らず巨大科学技術の開発は当初国家予算によって進められることが多い。日本も例外ではない。この開発資金の大きさに耐えて開発を進めるかどうかには当然政治も関係する。これまでの原子力開発の多くはこの枠の中での話が多く、民間努力だけでは経済的負担も大きく、順調な開発の進展が望み得ないと考えるべきであろう。

原子力発電も一九五〇年代後半の安価な石油価格の中で、経済的には、とても実用化が難しいと考えられていたが、石油ショックによる石油の値上がりという状況もあって、安全第一の中で改良を続けることによって少なくとも軽水炉による原子力発電は実用化し、熟成したと言える。これまでの原子力船開発、高温ガス炉開発、高速増殖炉開発等はいずれも国の原子力政策の中で開発を続けて、将来実用化に至る段階で民間に引き継がれる性格のものである。

がん治療等医療の目的に使用される施設もその建設・運転にかかる費用の全額を患者に負担してもらうには大き過ぎる。従って医療用の施設である原子炉や加速器も国の計画として建設・運転が進められている。これらは福祉国家への移行段階での負担と考えるのが妥当であろう。

社会との接点は政治、経済との関係以上に複雑で容易に整理して議論できるところにはないように思えるが、そのベースとなるところは人々が原子力を文明の転換をもたらす総合科学技術としてこれを理解し、その持つ巨大科学技術性や安全性の特徴を理解して原子力を心理的に

も容認できるようになることである。

原子力の宿命

このような性格を持つ原子力を開発し、人類社会に貢献させる状態に至るには、多くの優秀な人材、多額の開発資金、さらに長期にわたる開発期間が必要である。しかし、このような巨大性を宿命とする原子力を状況認識中心に見れば、時々マイナス面が強調され過ぎることになり、アンチテーゼが先行して開発にブレーキがかかることになる。一方、原子力開発のあるべき姿のみをことさら強調すれば現実社会との折り合いが悪くなり、一般社会あるいは国際社会に押し付けの印象を与えることになる。このため、総合科学技術としての原子力は単に科学技術的視点だけで捉えるのではなく、広く社会学、心理学、政治学また経済学等も総体として組み込んだものでなければならない。原子力を総合科学技術と呼ぶゆえんもそこにあると言えよう。

現在、原子力が転換期を迎えていると考えられる原因の多くは、このような社会環境との接点で誘起された問題にあると考えられる。従って原子力開発にあたっては時代の政治、経済、社会に対して、十分な状況認識をしておく必要がある。火の発見から石油文明の完成に至るまでに要した時間を考えると、原子力開発の長期展望のタイムスパンが数十年から場合によっては世紀にまたがるか、あるいは何世紀にもわたるかもしれないのに対し、これら社会的問題が

持つタイムスパンは往々にして数年から十年程度と短いものが多い。従って社会環境との間で当面する課題は、これを時代の要請として原子力開発の長期展望の持つ柔軟性の中で、これに答えるべき現実的方策を模索し、適切な解決策を用意することが要求されよう。原子力は付加価値が大きく、人類社会に多大の貢献が期待される半面、潜在的危険性もまた無視できるほど小さくないことを認識しておくべきである。

一方、もし長期展望抜きに現実の政治、経済、社会との問題点を拙速に処理しようとすれば、課題の複雑さのためその取り扱いに正確な判断が行えず、人生観や世界観といったある意味で心情的、情緒的思考が判断を左右することにもなり、客観的指標が明示できなくなることも考えられる。原子力は人類社会との間で相互に影響を与え合うことになるが、原子力と社会の調和を図る上で必要なことは、二一世紀社会に対する予測とこれに原子力がどのように応えられるかその研究開発の目標を示すことであろう。

総合科学技術としての原子力

多領域専門分野としての位置付け

二一世紀まであと数年と迫り、次代を長期的に展望する時期にあって、また、原子力開発が

半世紀を経過した現代にあって、原子力関係者に求められているのは二一世紀に人類が平和に豊かに生きていく上で原子力は不可欠というよりも、むしろ必然的な存在となり得ることを社会に分りやすい形で示すことであろう。

最近は人口、エネルギー、環境の問題が混然一体となってどこから手をつければ解決できるのか将来展望と筋書きが必ずしも明確でない。この中で原子力関係者には、二一世紀以降の人類の平和と豊かさの確保を前提にして、原子力の未来を再びきちんと話すことができるのかが問われている。未来を語りえない集団は魅力をなくし、その専門分野は多くの発展を望めないであろう。

若い世代に原子力に対する関心を持たせ、将来に対して夢の創出と可能性への挑戦の気概を持たせることは何にもまして重要と言える。転換期を迎えた現在にあっては、原子力とは何か、原子力の包含するものは何か、その範囲はどこまでか等を原点に立ち戻って考えることが重要である。

日本語で原子力と言った場合、どうしてもエネルギーを直接意味しているように思える。事実、原子力委員会の英語名はAtomic Energy Commisionであり、日本原子力学会の英語名はAtomic Energy Society of Japanとなっており、原子力は確かにエネルギーを意味している。

ところがアメリカの原子力学会はAmerican Nuclear Societyであり、ヨーロッパ原子力学

会はEuropean Nuclear Societyである。エネルギーの意味は直接には入っておらず、エネルギーを含んで更に広い領域になっている。

事実、学会誌の名前となるとアメリカがNuclear Science and Engineeringであり、日本がNuclear Science and Technologyといずれもが原子力科学技術と称している。

名前のいかんを問わず原子力関連分野の人の集まりはこの分野を原子力科学技術分野と認識し、その中に原子力発電を代表とするエネルギー開発の部分があると理解している。原子力はサイエンスの分野、技術の分野を幅広く含んだものと理解しておくことが望ましい。現在の日本原子力学会の活動は原子力を多領域専門分野と位置付け、科学技術に加え社会学、経済学、心理学の分野まで含む広がりを見せている。ここで総合科学技術という定義が意味を持っている。

原子力を包む世界

原子力はミクロの世界（クオーク、素粒子、原子核）とマクロな世界（星、宇宙）の双方にまたがるところに特徴があり、超先端的科学技術の領域から巨大科学技術の領域までを広く内包する。対象とする分野は多く、スケールも大きい。（図5）

原子力の特徴の第一は、われわれの日常的大きさ、すなわち一メートル程度とは桁違いの世界を扱いながら、その成果を人類の平和と豊かさに貢献させることにある。原子力は、原子の

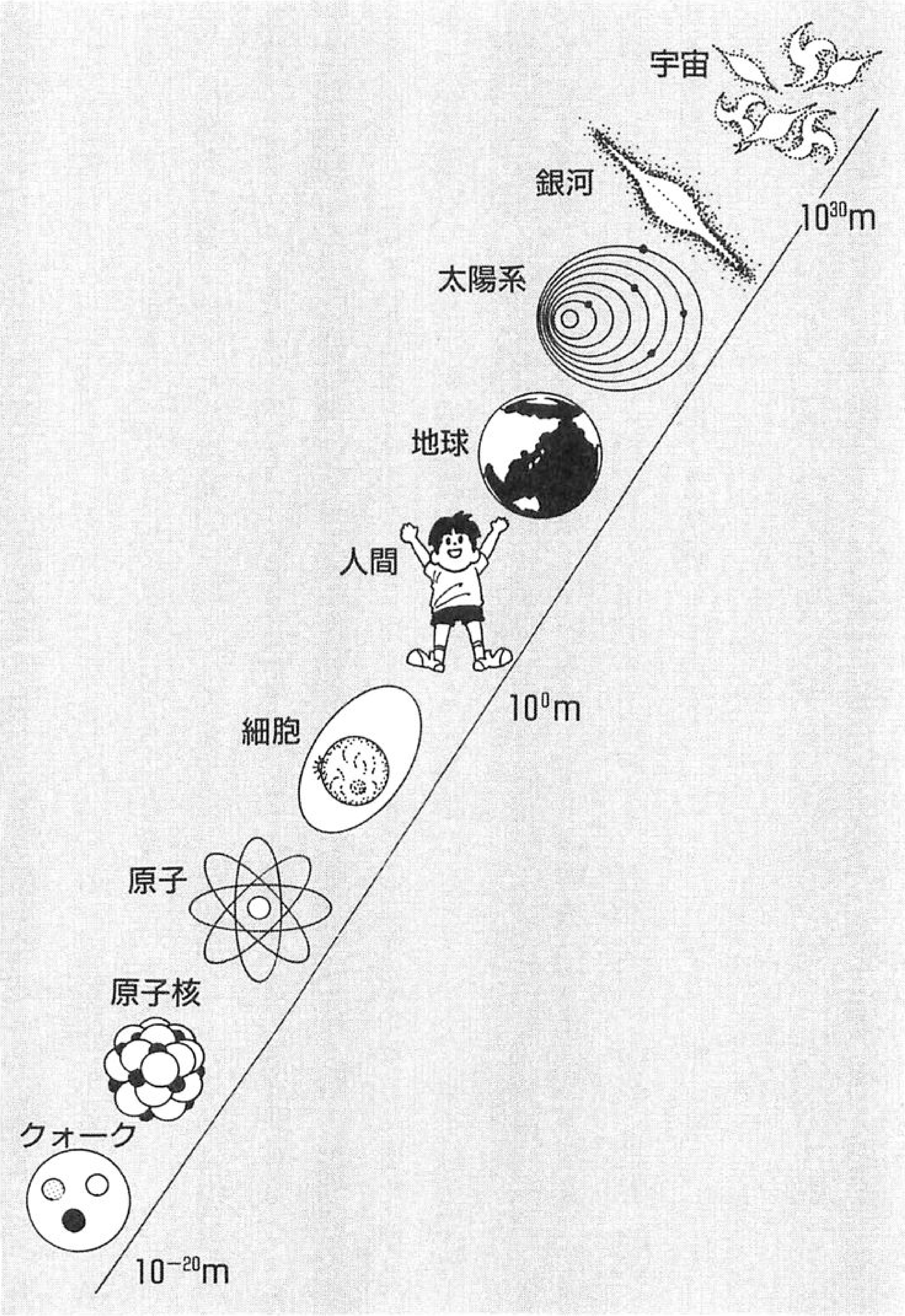


図5　クォークから宇宙：原子力が結ぶ世界

中心に位置している原子核の中に潜むエネルギーの解放と制御であって、対象とする大きさは一〇〇兆分の一メートルと小さい。石油文明が扱ってきた大きさが一〇億分の一メートルであったことと比較しても、そのまた一万分の一から一〇万分の一と格段に小さな空間であることが分かる。クオークの世界まで入り込めば更に小さくなる。

一方、自然界で原子核反応が自発的に起り、エネルギーを放出しているのは恒星の中であり、宇宙規模のスケールになる。例えば恒星の代表としての太陽は自然の原子炉になっており、その大きさは直径にして一四〇万キロメートルにもなる。このようにミクロの世界で原子核に光や粒子が衝突して起る諸現象と宇宙というマクロな世界での諸現象の双方にまたがるのが原子力の第一の特徴で、より宇宙の根源的現象に立ち入る話になっていく。原子核が保持するエネルギーの大きさは、原子の百万倍以上と桁違いに大きく、この解放と制御は原子や分子の場合に比べてより複雑で難しい。確かに原子核のエネルギーの解放は現在自然界でもただ恒星の中で行われているにすぎない。これまでの化学エネルギー（石油文明）の扱う世界に比べて原子力が扱う世界は質量および空間とも桁違いである。

原子核に光が当たったり、粒子が衝突したりすると核反応が起って大量のエネルギーが出入りして他の元素に変ることがある。これを原子核反応と呼び、原子力文明の出発点になる極微の世界での出来事である。核分裂にしろ、核融合にしろ反応の種類は異なるものの、この現象

がエネルギー取り出しの基本にある。また、原子核反応によって新しい元素が生まれてくるが、それらはもとの元素とは数も性質も違い、化学反応のように地球上の自然のエネルギーによってもとの状態に戻ることはない。各種の元素がつくられたのはビッグバン宇宙創造の時とその後の星の原子力によるものであって、現在は超新星現象等を除けば水素からヘリウムができる太陽の核融合反応のようなものしか考えられない状態にある。

このような特徴を持つ原子力を「放射線と原子核の反応をベースとした総合科学技術」と定義することは恐らく現在一般社会の原子力に対する認識とは大きくかけ離れているであろう。しかし、原子や分子の次に、より小さな世界である原子核を対象にするのは考えようによっては当然のことで、一九世紀後半に人類はすでにこの極微の世界に入り込んでいった。極微の世界は自然科学上の発見としては特筆すべきことであったが、更にエンリコ・フェルミ（注Ⅰ-6）の原子炉の製作によって一気に原子核の中に潜むエネルギーの解放に成功したことになる。

原子力の長期展望に当たっての価値判断の基準は、自然環境および人類社会との調和を前提条件としての平和と豊かさへの貢献であろう。このためには将来の人類社会の形態と生活様式に対する想定が重要になる。これは現在の社会の延長上に「利用から調和」への発想の転換を組み入れて、よりよいものを想定することになろうが、決して容易でないことはこれまでの歴史が教えるところである。自然との調和も人類社会の形態や生活様式と無縁でないため、当然難しさはあるが、これまでの自然環境の変化から考えて自然との調和については、地球環境の

現状に対する知見と認識が深まれば基本的対応の仕方は考えられる。
原子力の長期展望に当たっては、人類文明維持の必須要素であるエネルギー、物質、情報とそれらの機能を発揮させる方法論およびシステムに焦点を当てることから、将来の人類文明をその根幹で支える総合科学技術体系構築への夢と可能性を描き出すことが求められる。

サイエンスとしての原子力

未知の世界からの情報

原子力はその本質から見てその出発点において高密度のエネルギーと高性能粒子・電磁波を提供するものであるが、それが将来総合科学技術に成長する資質を持っていることの証明は原子力が未知の世界を探り、そこから新しい知見や情報を人類社会に提供するサイエンスとしての資質を持っていること、更に従来の科学技術の手法によっては期待できない新しい原子力固有の手法によって新しい科学技術、すなわち先端原子力科学技術の世界を切り拓いていくことができることとともに、従来の科学技術の総体を受け止めることができることを示すことであろう。従来の科学技術総体との関わりは正に原子力が総合性を持つことの証明そのもので、石油文明と置き換わってなお先行きに新しい世界があることを示すことができればよい。

これまでの原子力開発の中心がエネルギー開発であったため「原子力イコール原子力発電」との認識が一般的である。確かにこれまで原子力開発はその一つの中心であるエネルギー開発にほとんどの努力が払われてきたし、社会的接点も大きかったわけである。これに加えれば放射線の利用に関する認識ぐらいであろう。

確かに原子力開発においてエネルギー開発の重要性は高く、これが中心テーマの一つになることは否定できない。これは人類社会をこれまで支え、発展させてきたものの一つがエネルギーの供給だったからで、火の発見に由来するエネルギー源の開発やその効率的利用によって人類文明は長足の進歩を遂げてきたためである。将来、利用より調和がより高位の理念になることを考えれば、今後は整合性ある原子力システムとしての原子力エネルギーの開発が求められる。

一方、文明を支える基本的要素がエネルギー、物質および情報に加えて全体を構築するシステムだと前述した通り、エネルギーだけで文明が構築できる筈はない。従って原子力も原子力発電だけが従来の石油文明の中に入り込むのでは現代文明への異質なものの侵入と受け止められるのはやむを得ないことなのかもしれない。原子力発電が石油文明へのインベーダーとしてこれまで社会に受け止められてきた部分は否定できなかろう。やはり原子力自体が総体として文明を根幹で支えることが必要であるし、そこへ向けての努力が原子力開発そのものでなければならない。ところが、いつの間にか社会に原子力はただ単に技術として受け止められていっ

た。しかし、原子力のようなスケールの大きい科学技術の進展を技術の側面から捉えるだけでは不十分であり、その本質に迫るサイエンスの目を常に持ち続けることが重要である。原子力のサイエンスとしての特徴はその高密度のエネルギーと高性能の粒子、電磁波にある。

新知見の獲得と応用

高いエネルギー状態での原子核反応をベースとしたサイエンスは、正に元素の創成や宇宙の創造に直接つながるものであるところにスケールの大きさがある。現代のサイエンスはビッグバン理論に基づいて宇宙創造の謎に挑んでいる。また、中性子の原子核反応を中心にして、星の進化や元素創成の謎にも迫っている。原子力によって、現在自然界では見られないような高エネルギー粒子を人工的に得られれば太古の歴史を塑上した原子核反応が可能になる。原子を構成する電子と原子核、原子核を構成する陽子や中性子等の素粒子、更に小さな世界である物質の根源的要素としてのクオークの研究も二〇世紀後半に目覚ましい進展を遂げ、六種類のクオークのほぼ全部が実験的にも確認される状況を迎えている。

また、エネルギーがそれ程高くない状態での放射線と原子核の反応をベースとしたサイエンスは、元素の創成よりもう少し大きな世界につながっている。ここでは、原子・分子やこれらの集合である物質の世界を解明するため、新しい可能性を見出し、それに挑戦していくための手段として粒子線や電磁波が重要な役割を果たし、物質の組成や構造を変化させることができ

る。これはミクロなレベルでの物質の性質の変化を狙ったものであり、苛酷環境下での材料開発やイオンを物質に打ち込んでできる機能性材料の開発につながる新しい技術領域の開拓のほか、生体への応用も考えられ、医学、農学、水産学等の多くの分野への応用可能性を持っている。これらは原子や原子核レベルでの研究開発と位置付けられ、先端原子核科学技術の分野を切り拓いていくことになろう。

原子力の応用分野の中で、医学や生物学に関連した分野は近未来の特筆されるものであろう。ラジオアイソトープはレントゲンとともに医学分野で病気の診断等に古くから使用されてきた。しかし目下この分野での最大の関心事は生命の起源を探ることであり、遺伝子の世界の情報を原子力固有の性質を利用した方法で得るための研究が行われている。

放射線を生物学に取り入れた研究は、分子生物学を構築する上で大きく貢献したが、この分野への原子力の応用はラジオアイソトープから次第に高性能の粒子線やガンマ線をつくり出せる加速器や原子炉の導入へと移り、ヒトの遺伝子や染色体の研究、生命の起源の解明に迫る一方、放射線の影響を知り、放射線のリスクを明確にして人類と原子力の共存に役立てようとする研究もある。これに加えて原子力の応用は治療の分野にまで拡大されつつある。これについて特筆されるのは、原子炉を使った中性子線によるがん治療、あるいは加速器を使った陽子線や重粒子線によるがん治療である。前者は二〇年の歴史を持ち、大学や日本原子力研究所の研

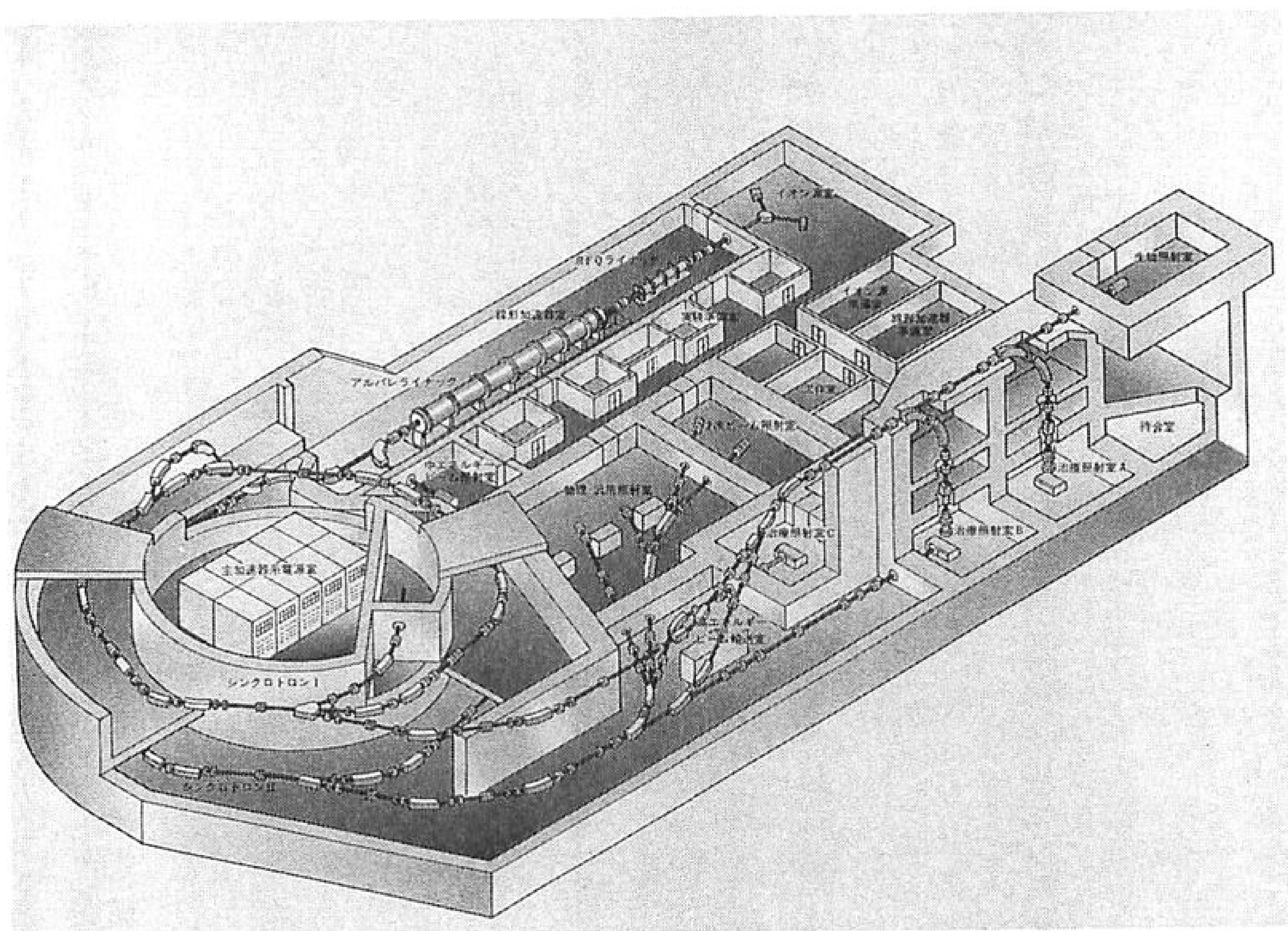


写真３　放医研の重粒子線がん治療装置「HYMAC」

究用原子炉による脳腫瘍の治療が行われてきた。後者の代表として放射線医学研究所に重粒子線がん治療装置（写真３）が完成して治療が開始された。このように原子力と医学が結びついた世界は、これからの発展が期待されるところである。

巨大技術と原子力

複合領域への広がり

原子力が総合科学技術として従来の科学技術の総体を受け止める上での要求は、当然のことながら現代文明に供給されているエネルギーと物質および情報を原子力によってまかなうことができることを示すことである。その中心は恐らくエネ

ルギー源としての原子力に対する期待であり、エネルギー資源の質と量が問われることになる。物質の供給についての多くの課題は、基本的に原子力のエネルギーと粒子線や電磁波の供給によって新元素の創成の分野に加えて原子・分子の結合を変化させて、有用物質をつくり出していくことであろう。

原子力が総合科学技術として成長していく上でその特徴を中心に他分野を見て適用を考える方向と、他分野がその分野を発展させる上で原子力を見る目が共に重要である。

学際的分野という言葉があるが、原子力のように多分野の境界領域を対象とするのではなく、それぞれの分野を集めて成り立つような総合的領域はむしろ複合領域あるいは多領域総合分野と呼ぶべきであろう。

確かに原子力も当初は学際的分野として出発し、「中性子学」「放射線学」および「安全学」などの原子力のベースとなる独自の分野を新しい学問領域として構築してきた。これらは原子力の分野で育ったものだが、最近の原子力は一歩進んで放射線と原子核の反応をベースとして他領域の分野も導入し、或いは他分野へも発展しているという意味ではすでに境界領域ではなく、複合領域としての性格を備えてきている。人類社会との接点を考えれば、原子力は更に政治・経済・社会・心理学等の社会科学、人文科学の分野も同時に含む、正に総合的科学技術分野へと発展してきている。

巨大科学技術

さて、原子力システムは、巨大科学技術としての本質的特徴を持っている。原子核反応を起こすためには電子線、陽子線、重粒子線、中性子線、ガンマ線等々をつくり出さなければならない。

加速器はこれまで宇宙の創造や素粒子の探求といった、人々に夢を売る科学の世界での活躍が中心であった。これらの研究では高エネルギー現象を再現するために大型加速器が必要で、直径十キロメートルにもおよぶ円形加速器（シンクロトロン）や全長数十キロメートルにもなる線型加速器（ライナック）等がある。スケールから言えば、当然巨大科学技術の仲間であるが、世界でも数えるほどしかなく、巨大科学技術というだけでは当該施設の設置される地域は別にして、社会的なあるいは政治的インパクトは大きくなく、そこでの科学的成果についてては世界的に専門家の間で評価されても、加速器の存在そのものについては社会的関心はあまり払われなかった。一方、小型の加速器は数多くあり、原子力開発の初期に原子核物理や原子炉物理の研究に利用されたものや材料研究、非破壊試験に使われたもの等もあり、先駆的研究を支えてきたが、これも社会に影響を及ぼすことなく、同様に多くの関心が払われなかった。しかし、二一世紀になると加速器の応用分野は科学の世界にとどまらず飛躍的に拡大する可能性を持っている。医学、生物学、材料科学、レーザー開発等の物質分野に利用するほか、慣性核融合炉や加速器核分裂炉のように、エネルギー開発の分野にも加速器が応用される期待がある。

利用分野	応用分野
放射化分析	考古学、環境科学、犯罪科学、地質・地球科学、医学、生物学、工業製品検査など
ラジオアイソトープ生産	医療分野、農業分野、工業分野での利用、遺伝子工学、地質調査など
半導体製造	大電力用サイリスタ、パワートランジスタ、ダイオードの製造など
医療照射	脳腫瘍、がんの治療など
中性子散乱実験	結晶の構造、分子の構造の研究など
中性子ラジオグラフィ	非破壊検査など
材料・燃料照射実験	原子炉用材料・燃料の開発など
即発ガンマ線分析	元素および同位体の分析など
教育訓練	原子力技術者の養成など
その他	極冷中性子による素粒子論の研究、原子炉の安全性研究など

参考資料＝研究炉利用ハンドブック（日本原子力研究所）

表1　発電用以外の原子炉（研究用原子炉）の利用とその応用分野

利用分野	応用分野
素粒子・宇宙物理	新粒子の発見、およびその性質の解明、宇宙の起源
原子核物理	原子核の構造と反応の研究
医学・生物学	放射線医療、放射線による殺菌、生命活動の解明
材料科学	結晶構造の解明、放射線による物質構造の変化
レーザー開発	シンクロトロン放射によるレーザーの生成
慣性核融合	荷電粒子、レーザービームを用いたエネルギー閉じ込めによる核融合の達成
加速器駆動型原子炉	高エネルギービームによる破砕反応、蒸発過程からの中性子を用いた核分裂

表2　加速器の利用とその応用分野

このような状況になれば当然、人類社会や自然環境との間に多くの接点ができ、互いに影響しあうことになってこよう。

原子炉は逆に「原子力イコール原子力発電」との認識の中で開発当初からその巨大科学技術としての特性と、安全を中心として社会や自然環境との接点がクローズアップされてきたため、原子炉の持つ中性子やガンマ線を使った原子核反応をベースとしたサイエンスの分野があまり注目されてこなかったと言えよう。しかし、原子炉を中性子源やガンマ線源として利用することも多く、その応用分野は更に広がるものと思われる。

このように加速器と原子炉は、これまでの生い立ちと成長のプロセスは異なるにしろ相似た性質も多く、原子力の中で二つの巨大技術と考えられる。このような巨大技術としての特徴を持つ加速器と原子炉はそのシステム構築のためには原子力固有の技術に加えて広い在来技術の裾野を求めたり、新たに構築すべき関連先端技術を必要としている。

表1、2（前ページ）は加速器と原子炉の応用分野を示したものである。これを見るとその応用分野の広さと先端性がうかがえよう。

2 プルトニウム・その象徴性と現実

あかつき丸の提起した問題

プルトニウムをめぐる諸課題

あかつき丸（写真４）のプルトニウム輸送に代表される昨今の日本の原子力の動向に対する国内外の反応は、明らかに原子力が技術的、経済的存在にとどまらず広く社会的存在となっていることを具体的に示したと言えよう。国際的にも日本は世界の原子力開発に対して主要な位置を占めることになり、日本の原子力の動向を国際政治の立場を含め世界が注目していることを如実に物語っている。また、北朝鮮の核疑惑に対するアメリカの過敏とも思える対応や国際原子力機関（ＩＡＥＡ）の査察に対する北朝鮮の対応もプルトニウム問題の世界政治における難しさと不鮮明さを示している。これらは米ソ冷戦構造崩壊後の世界秩序の再構築を求めての生みの苦しみと言えるのかもしれない。

原子力開発もすでに半世紀に及び日本でも四〇年の歴史を持つ。また、時あたかも二一世紀を指呼の間に迎えようとしている現在、プルトニウム問題は原子力の夢と可能性の内容にまで



写真４　東海港に入港する「あかつき丸」

踏み込んだ将来展望と現実の世界政治との関連をも踏まえて考えておくことが望ましい。

プルトニウムほど原子力の整合性の観点からの位置付けと現実とのギャップが大きいものはなかろう。プルトニウムは世紀を超えて長期的に見たエネルギー資源確保の観点からは不可欠の物質であるにも拘らず、その毒性が社会的に危険視されるほか、国際政治上は核物質としての兵器転用すなわち核拡散の問題をはらんでいる。エネルギー利用の側面からの期待と同時に軍事利用の観点からの心配を合わせ持っているというのは、それだけプルトニウムがすぐれて魅力のある元素であることを示すものであり、それだけに利用に当たっては注意を払わなければ

ばならないと言えよう。

プルトニウムが核戦略物質の代表的かつ象徴的物質として捉えられるのはそれだけの理由もある。プルトニウムの名前の由来、天然にない人工元素であること、化学的操作によって比較的簡単に純粋なプルトニウムが抽出できること等々である。

人類はすでにプルトニウムを発見し、生産し、平和目的の原子力発電でも利用している。一方で長崎の原爆で核兵器として一度使用された。プルトニウムを人類は平和目的に限って財産として活用するのか。あるいは原子力発電で生み出されるプルトニウムまで負債であるとして費用をかけてでも人類社会から隔離し、核戦略物質としての意味をなくすことのみを考えるのか。または核戦略物質であるため、これを全面否定し原子力の平和利用そのものを放棄するのかの三点である。それぞれの内容を吟味し、冷静な判断のための情報を提供することが必要である。

人類は一九世紀後半から原子核の世界に入り込み、これまで原子核に関する研究開発はすでに一世紀に及び、科学技術の世界で多くの先端分野を切り拓いてきている。原子力をエネルギーとして捉える分野はその一端であり、全体ではない。

文明は明らかに石油文明から原子力文明へと着実に移行している。この事実を否定することはできない。その意味から原子力平和利用を全面的に禁止することは無意味であろう。原子力

を総合科学技術として捉える立場から見れば、その一つの中心となるエネルギー源としての活用を放棄して、耳障りの良い医学利用等、原子力が持つ科学技術の一部分の研究開発だけを進めるのは短期的にはともかく、長期的には順調な原子力文明の発展を期待できないことになり、不自然な対応となろう。

次に原子力のエネルギー源としての役割を認めながらもその中心となる物質を負債とし、否定しようとする考え方について言えば、プルトニウム利用に現在経済性がないのは開発が進んでいないためと理解すべきであって、原子力がエネルギー源としての果す役割の中心となりうる物資であることは十分理解しておくことが望まれる。しかも核戦略物質という意味ではプルトニウムは象徴的存在であって、能力的に多少の差はあるかもしれないが、ウラン235でもウラン233でもこの代役をつとめることが可能である。

ウラン233はトリウム232が中性子を吸収して核転換によって得られるところはプルトニウムと似ており、その使用に当たっては同様に再処理の過程が必要になると考えてよい。トリウム232はウラン238と同様に核分裂を起こす物質に転換（注I-7）されるところから核分裂親物質と呼ばれているが、核兵器開発の上からはもちろん、燃料サイクルの観点からも高温ガス炉や溶融塩炉（注I-8）との結び付きがあるだけで、主流にはなっていない。しかし、ポテンシャルの問題としては核兵器転用の可能性はなしとしない。従って、原子力を肯定し、プルトニウムを否定し、ウラン233やウラン235でその代役を果たそうとする考え方も現実的にはある程度の意味を持

つものの、核兵器に対して一国の強い意思が働く場合にはあまり意味を持たないのではなかろうか。

特にウラン235の場合にはプルトニウムやウラン233と違って再処理のプロセスが必要でなく、天然ウランを濃縮することで得られる。事実、旧ソ連の核兵器の原料はウラン235も量的に多いと言われているし、マンデラ政権ができる前に廃棄したと宣言された南アフリカ共和国の核兵器もウラン235を原料にしていたと言われている。

また、人工の原子力全体について言えば現在世界的レベルで開発が続けられている核融合も核分裂と同様の、あるいはそれ以上のエネルギー資源としての特色を持っている。核融合燃料の代表はトリチウム（注Ⅰ-9）であり、よく知られているように水爆の原料として使用される。トリチウムは自然界には存在しない人工元素で、プルトニウムと同様に元素転換のプロセスを経てリチウム等からつくられる。従って現在のプルトニウムに関する議論をそのまま純粋培養していくと、トリチウムもプルトニウムと同一のカテゴリーに入り、その使用に対して否定的な結論に導かれよう。

現在の原子力発電の主流である軽水炉では、ウラン235の割合が三～五％という低濃縮ウランを使用しているが、以前は濃縮度が九〇％程度の高濃縮ウランを使用する高温ガス炉や研究用原子炉もあった。現在は核拡散防止の観点からこのような高濃縮ウランを使用する原子炉はほ

とんど姿を消している。また、ウラン濃縮については核不拡散の観点から安全管理が厳しく行われ、これまで施設の見学も受け付けないような状態にあり、平和利用といっても秘密の中に安全を確保しようとしてきた。情報公開の全体的な流れの中で濃縮や再処理等の燃料サイクルに直接関連した分野においては、未だ一般の目にふれない部分が存在している。

プルトニウムへの期待

プルトニウムに対するネガティブな議論の一つは当然、核兵器転用の問題であるが、更に平和利用の観点からもプルトニウム利用が経済的でないことをあげている。確かに現在のエネルギー需要の伸びの鈍化は決して原子力に直接、多大の要求を出し、早期に多くの原子力発電所の導入を求めてはいない。ウラン市場も需給がひっ迫しておらず、買い手市場だと言われている。

従ってこれまでのように利用の観点からエネルギー問題を議論する限りにおいては短期的とはいえ、プルトニウム不要論は妥当性を持つと言える。しかし、この種の問題は自然との調和、社会との調和を前提にして考えるべき時代に至っている。環境保全の観点からは、例えば化石燃料のコストを炭素税とか環境税の導入で経済的単位で比較のベースを統一して、その使用の是非を判断しようとする試みが世界的規模で検討されている。すなわち資源を取得して使用するための経費と利益から値段が決まるのでなく、それが自然や社会に与える影響も必要経費の

中に含まれようとしている。プルトニウムの場合も同様で人工資源であってもウランからつくられるものであるから環境保全、自然保護の観点からはそのコストはウラン鉱の採掘から燃料サイクル全般にわたって関連している。

自然環境に影響を与える可能性に対してあらかじめ予防措置を講じておくことはすでに現在の科学技術でも行われているところであり、原子力の安全対策は正にその代表的なものであろう。

プルトニウム問題を肯定的に捉える議論としてリサイクル論があるが、これは現代社会での再生紙の利用やアルミ罐の再利用に代表されるリサイクル論と同一であり、「ウラン燃料を一回使ったきりで使い捨てにするのか」、「リサイクルしてウランやプルトニウムを分離回収して再利用すると同時に廃棄物対策を合理化する」と、ゴミの場合と共通の問題に帰着させることである。確かに都市のゴミ問題はエネルギーや資源の大量消費が生んだ深刻な問題で、その根本的解決は容易ではない。排出側の立場から見ればゴミの発生量を削減するために再処理、再加工によって再利用の可能性のある物質をゴミから回収してリサイクル（再循環）させようとするものである。上流側では森林の伐採や資源の乱獲を抑えることにつながり、これは同時に原材料を節約することにもなるので省資源になる。しかし、経済性の上からは必ずしも安価とは言えず、再利用しない場合に比べて割高になっている場合もある。再生紙の利用についてはわ

ざわざこの旨を記して環境保全に積極的に参加していることを宣伝するところもあるが次第に定着してきている。プルトニウムをこの点から捉えたものがリサイクル論であるが、この考え方は、プルトニウムの有効利用問題を一面でしか把握していない。プルトニウムは長期的視点に立って素直に考えれば、原子力を自然や社会と調和を図りながら永く人類のエネルギー源として使用していく上で基本的な物質であることが理解されよう。ここには新しい価値の創造の観点を欠落させてはならない。

従って、このようなプルトニウム技術の開発は、将来の高速増殖炉時代、更には「自ら整合性ある原子力システム」の導入へ向けてのステップとして考えるべきで、プルトニウムを全面的に使用する時代には、単に再生利用的発想では済まないのは当然である。「自ら整合性ある原子力システム」が中心となる時代は炉の中でできたものをもったいないから再生利用するのでなく、利用より調和をより高位の理念にして、全体的に「自ら整合性を持つ原子力システム」を構築するものであり、単なるリサイクル論では不十分である。このような未来の夢を実現する技術開発は将来的に原子力の平和利用の存続を肯定する観点に立てば不可欠のことであり、エネルギー需要がゆるんでいるからといってプルトニウム技術開発の不要にはつながるものではないと言えよう。

先端科学技術と軍事利用

両刃の剣

原子力を開発していく上で、常に暗い部分として存在するのは核の軍事利用についての議論であろう。

化学エネルギーに比べて桁違いにエネルギー密度の高い核エネルギーを爆弾にして使えば、その威力は大きいものになることは当然で、これは広島、長崎で経験したことであり、放出されるエネルギーの巨大さに加えて放射線による影響も大きく、直接死のほか後遺症や晩発性疾患に苦しめられることになる。この両者から解放されるために日本は核の軍事利用については一度として関心を示すことはなかった。

原子力に限らず現代の先端科学技術は平和目的に限ることは残念ながら難しく、何らかの意思が働けば、軍事転用が可能と考えられる。日本で宇宙開発の一環としてロケットの研究が進められ人工衛星が打ち上げられてもいるが、Ｈ２ロケットの打ち上げが見事成功した際にも日本の核兵器開発に対する懸念が表明された。この技術がプルトニウム技術と結びつけば核ミサイルとしての軍事利用につながるとする懸念である。日本ではプルトニウム技術は原子力開発の中で将来の重要なエネルギー資源を確保するための先端科学技術として、またロケットは宇宙開発の中でその中心となる先端科学技術として平和目的に限って開発が進められてきたもの

であるが、日本の意図に対して疑念をはさむ向きもある。日米安全保障条約をベースに世界的に見ても相当な通常軍事力を持っている日本が、将来核兵器開発に対する野心を持つのではないかとの疑念であろう。

平和目的の工業製品が意図に反して軍事目的に利用されたとされる例は皆無だったわけではなく、潜水艦のスクリュー音の低減に使われたとするココム違反の例や、湾岸戦争でイラクの首都バグダットの攻撃に使用されたパトリオットミサイルの制御装置に日本の電子部品が使われていると伝えられたこと等がある。更に最近の例では北朝鮮が核兵器開発の疑いがかけられたおり、国際原子力機関（ＩＡＥＡ）やアメリカから北朝鮮にある数カ所の核施設の内容について査察が求められたが、この疑念の中には日本からの工業製品や資金の流出等も含まれていると言われた。いずれも、その実態や信ぴょう性についてはともかく、平和目的に開発された技術でも意思が働けば軍事転用が不可能でないことを示唆するものであり、技術的観点からすべてを抑止することは不可能と言えるのかもしれない。

プルトニウムは核戦略物質の象徴として扱われているもので、原子力の平和目的に限った開発も、他の先端技術開発と同様にあるいはその威力から見てそれ以上に軍事転用の問題を意識しておく必要がある。核兵器転用の可能性はプルトニウムに限らず、ウラン235でもトリウムの元素転換によって生まれるウラン233にもある。一方、同じプルトニウムでも平和目的に限って

原子力発電に利用される軽水炉のプルトニウムは核戦略物質としての能力は原爆級プルトニウムと比べて格段に低いとされる。北朝鮮が開発を進めてきた黒鉛減速炉に代えてアメリカが軽水炉を日本、韓国と協力して提供しようとしているのは黒鉛減速炉からのプルトニウムに比べて軽水炉からのプルトニウムが原爆の材料としての性能をほとんど持っていないためだと考えられる。

事実、軽水炉の使用済み燃料からプルトニウムを抽出して原爆をつくった例は耳にしないが、大学生ですら実験室レベルで原爆をつくることができると宣伝され、カーター政権の時代に、軽水炉プルトニウムで原爆をつくることが理論的に不可能と言えないと判定され、核拡散の議論は平和目的の原子力開発にも大きく影響を与えるところとなった。もし本当に大学生が実験室で原爆製造が可能だというならこれを技術的側面だけから防止しようとすることは無意味なのかもしれない。査察、衛星による監視等々原子力開発が性悪説を前提にすれば暗いものになるのは避けられない。この暗さから解放されるためには、核兵器を持つことに意味のない国際社会をつくり出すことを究極的目標とし、それに向けての絶え間ない努力を積み重ねていくことである。その途上において現実的措置として自らすすんで査察、監視を受け入れることが重要である。核拡散防止条約（ＮＰＴ）への加盟による核拡散防止への意思の表明とＩＡＥＡの査察を積極的に受け入れて原子力開発の透明性を世界に示し、実態を明らかにすることによって原子力の平和利用を確実にしていくことは論を待たず重要かつ基本的な事項である。

しかし、この一般論がそのまま世界のすべての国に通用するかとなると話は簡単ではない。第一は、すでに核保有国があり、世界で現実に認められていると同時に国連の安全保障常任理事国として、世界政治上重要な安全保障に拒否権を持って参加している。ＮＰＴには一七八カ国（一九九五年五月現在）が加盟し、その存在は現実的にも効果を持っているが、この条約は核保有国の存在を容認した上で非核保有国に核兵器開発の意思の放棄とＩＡＥＡによる査察を義務付けるものである。

この条約が永く意味を持ち、究極的目標に近づくためには核保有国が少なくとも核実験の全面停止に合意し、更に将来へ向けて核兵器の全面的廃絶と平和目的への転用に明確な意思表示と具体的なアクション・プランを示すことが何にも増して重要である。不平等を前提としたままではいつか破綻をきたすところとなるのではなかろうか。また、ＮＰＴに参加していない国としてインド、パキスタン、イスラエル等々の国があり、ＩＡＥＡの査察は核保有国と同様これらの国に及ばない。

核の抑止力か核の廃絶か

これまで核保有国である国々、これはアメリカ、ロシア、中国、イギリス、フランスの五カ国であるが、これらの国々と核の保有を放棄することを誓って加入する国々との間に基本的に不平等があり、その中で核拡散防止条約（ＮＰＴ）への加盟が続けられてきたことは事実であ

る。核保有国が核兵器の開発段階での核実験によって自国のみならず他国に迷惑をかけたことも事実である。クリスマス島、ビキニ島、ネバダ、セミパラチンスク等での核実験（注Ⅰ-10）は今でもなお影響を残しているところである。日本とカザフスタン共和国との初の協定がカザフスタンにおける核物質の計量管理と核実験による被曝者の医療に関するものであったことは平和利用を望む日本の援助としては好ましいものであると言える。しかし、現実的に考えれば「核の抑止力」と言われるバランスによって、世界は局地的紛争はあっても、米ソ二超大国の核の威力で平和が保たれたとする考え方ににわかに反対することは容易ではなく、現実的な結果として反論しにくい側面も持っていた。

しかし、だからといって日本にとって核兵器廃絶は悲願である。第二次大戦の終結が広島、長崎の原爆投下によって可能になり、更なる被害を未然に防いだとする原爆投下肯定論をそのまま認めるわけにはいかない。過去における事実の肯定は将来において状況次第で再び原爆の肯定につながらないとの保証にはならないからである。未来永劫にこの不平等を前提にして世界平和が確保されるとは思われない。一国の強い意思が働いた場合、核兵器開発が可能と考えるのが「技術の拡散可能性」を理解すれば当然であろう。たとえ核兵器の所持がその国の国益だと考える国々においても核兵器が「使わない兵器」であり、「使えない兵器」であるとの認識はあり、恐らく世界平和を望み、地球環境の保全を望む国および個人にとってはこれを将来所有することに意味のない兵器として位置付けていくことが願望であろう。

核兵器全面禁止へ向けての道しか核兵器の問題の解決はない。

核兵器の禁止は同時に平和利用の禁止に至るとする論は認められない。地球上に最初に現れたのは核兵器であって原子力発電ではない。すなわち平和利用がなくても軍事利用は存在し得るのである。人類はすでにプルトニウムを手に入れている。プルトニウムはその価値を十分活かして平和利用に向けるべきであろう。

核拡散防止条約

ソ連の崩壊は必ずしも当時世界が求めたような平和をもたらさず、旧ソ連邦ＣＩＳの中に、あるいはユーゴスラビアに、あるいはカンボジア、モザンビーク、ルワンダ等に内戦とも思えるような紛争をもたらし、または緊張を与えている。一方、核兵器の観点からはロシアおよびＣＩＳ諸国に設置された核施設の処理、および核物質すなわち原水爆の原料であるウランおよびプルトニウムの処理が目下課題になっている。

この機会に世界の国々は核兵器廃絶のため、あるいは少なくともこれをめぐる新しい世界秩序確立のため何ができるかが問われることになろう。アイゼンハワーの「平和のための原子力」以降、日本はアジアの片隅で非核三原則を標榜して平和利用にこれまで専念してきた。その間、一度も核兵器の所有を意図したこともなく、世界で唯一の原爆被爆国として世界に核兵器の廃絶を訴え続けてきた。現在の世界情勢の中で日本は平和目的に限って原子力を開発する

意思とともに自ら理念とする原子力開発の長期展望を明確にする一方、現実に世界の核不拡散の動きに対してどのような貢献ができるかを考え、積極的行動を惜しむべきではない。

一九九五年五月、核拡散防止条約（NPT）の無期限延長が国連の再検討・延長会議で無投票で承認された。NPTの延長は、もちろん重要であり国連中心外交をとなえ、また、被爆国としての悲惨な体験を持つものとして、現在より一歩でも理想に近づくべく努力することは当然である。日本がこれだけの経済力と技術力を持ちながら、核兵器の保有を考えていないことに疑問を持つ国は多く、これまでの努力によっても残念ながらこの疑念を晴らすことはできていない。被爆国として核兵器廃絶に対する国民の悲願に加えて、日本が核兵器を保有しない最大の理由は「持っても意味がない」、「核兵器の所有が国益に全くつながらない」という客観的条件があることだろう。

すなわち、日本の核兵器を所有する意義を持たない国としての位置付けは更に明確になっていくだろうし、これを世界に主張していくことが必要だろう。アジアには核保有国として中国が存在し、これに加えて現在中国とのつながりが最も深いとされる北朝鮮が核開発の疑惑を持たれていた。しかし、今後の世界で一国が鎖国状態であっては技術的、経済的自立ができないと考えるならこのような国際社会に容認されないような政策は明らかに破綻を来すことになろう。南アフリカ共和国が人種差別をやめて国際社会に復帰を図る中で、自国で開発した核兵器を放棄したことを自ら表明したことは記憶に新しいし、多くの国々が核兵器開発の立場を取ら

ず、NPTに加わるのは日本にとっても喜ばしいことである。

NPTに加盟することがどの国にとっても国益に合致し、永い将来にわたって人類社会と調和し、共存できるような国際合意を形成していくことが望まれると言うならば、人道主義的立場に加えて具体的なメリットを保証することも重要であろう。

日本はこれまでの平和利用に限った自らの原子力開発の姿勢を維持しつつ、世界に平和利用に限った原子力開発が具体的に存在していることを示す必要があろう。核保有国でない原子力先進国の日本、ドイツなどはその責任を負っている。国連の安全保障常任理事国に日本のような被爆体験を持つ非核経済大国が参加して、核の廃絶を主張することも十分意義あることだろう。

世界は、そして人々は恐らく核兵器と通常兵器とを区別して認識していると考えられる。朝鮮戦争やキューバ危機で原爆使用をアメリカが口にしたことはあっても結果的には抑制され、戦争による原爆投下は広島、長崎だけで済んでいる。このことを見ても核兵器は特殊な兵器として位置付けられているように思える。日本は自らの意思で、核武装することはなく、平和目的に限った原子力開発はその透明性を確保することを常に心掛けてきている。資源小国の日本にとってプルトニウムをエネルギー源とするオプションは重要である。現在、すでに世界の先進国の仲間入りをしているとはいえ、いま日本が平和利用のプルトニウムの技術開発を放棄したとすれば世界の核軍縮が一気に進み、核拡散が防止できるとは考えにくい。むしろ核拡

散の抵抗性のあるプルトニウム技術を確立しながら平和目的の技術開発を進めていくことの方が日本の世界への貢献になると考える方が素直であろう。プルトニウム技術の開発とプルトニウムの大量所持とは別次元の話であることを認識しておく必要がある。

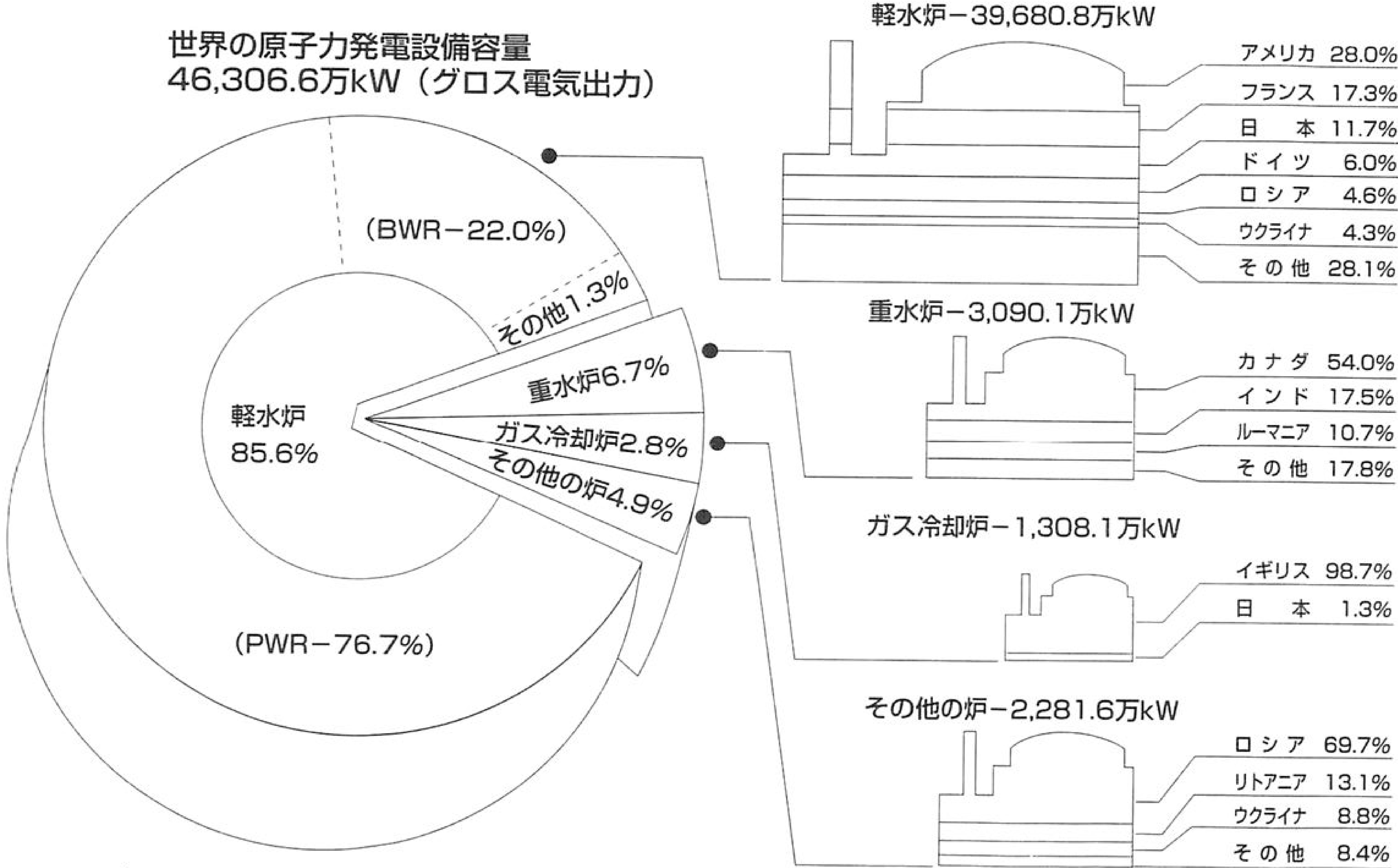
原子力の平和利用

プルトニウムオプション

二一世紀の平和で豊かな人類社会のエネルギー源として原子力の平和利用を志向する立場に立てば、プルトニウムを長期のエネルギー源とするオプションは重要である。人類は原子力発電を実用化し、プルトニウムをすでに手にしている。一方、「自ら整合性ある原子力システム」の構築に向けて長期展望を明確にし着実に技術開発を進めていくためにはプルトニウム政策は一国の原子力政策の中心的位置を占めるものとなろう。残念ながら現在の世界各国のプルトニウム政策は核拡散防止の立場からの議論もあって、平和利用の長期展望の中で決定されているとは思われない。

現在、世界の原子力の主流は軽水炉による原子力発電（図6）である。

軽水炉では燃料のウラン235が二個核分裂を起こすと、大略一個のプルトニウムが副産物とし



（1994年12月末現在 日本原子力産業会議資料による）

（注）構成比の合計は四捨五入の関係で100%にならない場合もある。

図6　世界の炉型別原子力発電設備容量（運転・建設・計画中の合計）

て生まれる。核転換の様子は簡単ではなく、プルトニウムの同位元素やネプツニウム、アメリシウム、キュリウム等の超ウラン元素（ＴＲＵ）も軽水炉の運転とともに生まれてくる。軽水炉の中で生まれた超ウラン元素の中には更に核分裂を起こして発電に寄与するものがあるが、その寄与はプルトニウムが圧倒的である。軽水炉では燃料をできるだけ原子炉の中で長く燃焼させ発電に寄与させるため、一度原子炉の中に入れると三～四年は燃焼を続けさせる。燃料交換に至る最終の段階では、ウラン235よりむしろ運転中に生まれたプルトニウムの核分裂の方が多く、全体の六〇％くらいになっている。運転期間を通しては平均して三〇％程度発電に寄与している。

軽水炉の中では燃料であるウラン235やプルトニウムを全部完全に燃焼させることはできない。これが大きな特徴になっている。このため、軽水炉では燃料は三～四年原子炉の中で燃焼を続けた後、使用済み燃料として外に取り出される。使用済み燃料の組成では核分裂の連鎖反応を継続する能力を持っていないため、新しい燃料と交換される。軽水炉のように長期間燃焼を続けると、プルトニウムの一部も中性子を次々と吸収して燃料の中には種々の質量の大きいプルトニウムやアメリシウムのような超ウラン元素が生まれるので、原爆級のプルトニウムとは違った元素が多く含まれるようになる。このため、原爆の材料としての能力はほとんど失われている。

使用済み燃料の中には燃え残りのウラン235や核分裂性プルトニウムが含まれており、原子力平和利用の観点に立てば明らかに天然ウランより価値の高いものであると言える。この使用済み燃料の価値を認めて再利用を図るか、あるいは認めず廃棄するかで再処理の必要性の有無が出てくる。

使用済み燃料は電気出力一〇〇万キロワット級で年間二五～三〇トン発生し、その中に約二〇〇～二五〇キログラムのプルトニウムが含まれている。これらは原子力の平和利用の結果生まれてくるものである。

一方、軍事目的のプルトニウムは現在、アメリカおよびロシアにそれぞれ一〇〇トン程度あると言われており、こちらは軽水炉の使用済み燃料中のプルトニウムとは組成の大きく異なる原爆用プルトニウムである。これらの約半分は冷戦構造の崩壊による軍縮の結果不要になったと言われ、その処理が課題となっている。

イギリス、フランス、中国も核保有国であり原爆を所有しているが、どれだけのプルトニウムを保持しているか等は明確でない。アメリカ、ロシアとは桁違いで一〇分の一にも満たない程度であろう。

軍事プルトニウムの平和利用

ここで軽水炉の使用済み燃料に含まれるプルトニウムを中心とする超ウラン元素と原爆用プ

ルトニウムの質的および量的比較をしておこう。ただし、原爆関連の正確、詳細なデータは持ちあわせていないため大雑把な比較でしかない。

原爆一個に必要なプルトニウム量は原爆級プルトニウムで一〇キログラム未満だと言われている。これまで長崎に投下された原爆の大きさから八キログラムと言われてきたが、最近の技術では更に少量で五キロ程度のプルトニウムでも、原爆にできると言われている。これは核分裂の連鎖反応が継続するための必要条件を満たすプルトニウム量である。軽水炉の使用済み燃料中のプルトニウムを回収して連鎖反応を起こすためには更に多量の恐らく十数キロのプルトニウムが必要で、また性能となると大きな違いがあって、事実上原子炉にはなっても原爆と比較できるような性能のものにはならないであろう。

性能の話は別にして量だけで比較すると、一〇〇万キロワット級の原子炉から毎年使用済み燃料として取り出されるプルトニウムで二〇個程度の核弾頭がつくられるとの計算になる。アメリカだけで原子力発電によって今世紀末までに四〇〇トンのプルトニウムが使用済み燃料の中に蓄積されることになると言われているので、平和利用で生産、消費されるプルトニウム量は軍事利用のプルトニウムと比べて質は決定的に異なるにしても量は相当多い。日本でも青森県六ケ所村の再処理工場では年間約五トンの軽水炉級プルトニウムが再処理されて出てくることになる。原爆一個の最小プルトニウム量をベースに、軽水炉から出てくるプルトニウムを見ると、これが原爆の材料になるわけではないにしろ量的認識は必要であろう。

北朝鮮で問題となっている原子炉は熱出力は五〇〇〇キロワットの黒鉛減速炉だと言われているから電気出力一〇〇万キロワット級の軽水炉の熱出力約三〇〇万キロワットと比べて出力は六〇〇分の一にしかならない。それでも核開発が疑われた。一国の意思があれば核兵器製造が可能であると言われる論拠がこの辺にある。日本もその気になれば核兵器開発が可能だと言う暴論に近い議論も、プルトニウムの量の観点だけからは一笑に付すわけにもいかない。平和利用に限るとの日本の意思は繰り返し世界に訴えることが必要なのと同時に目的のはっきりしない余剰のプルトニウムを蓄積しないように政策の具体化を進めることである。

一方、現在なぜ全核兵器の廃絶ができないのかとの議論の重要さは認めながらも、冷戦後の核軍縮の流れの中で軍事用プルトニウムの半分が不必要になったと言われていることを前提に、軍事用プルトニウムを平和利用に転じて、どれだけの発電が可能かを見てみよう。

軍事用プルトニウムを軽水炉の燃料として使用するには現在のウラン燃料とほぼ同じ性質のものにして使うことになり、例えば加圧水型軽水炉（ＰＷＲ）では軍事用プルトニウムをウランで六～八％程度に薄めた混合酸化物燃料（ＭＯＸ、注Ｉ-11）に加工することになろう。従って一〇〇トンのプルトニウムは約一五〇〇トンのウラン燃料相当になり、一〇〇万キロワットの原子力発電所で約一五基分の燃料となり、現在の軽水炉では炉心の三分の一程度に装荷することを考えているから約五〇基分となる。一方、一〇〇万キロワットの原子力発電所で熱効率

三五％、稼働率七〇％とすると年間約〇・五トンのプルトニウムを消費することになる。従って一〇〇トンの軍事用プルトニウムで二〇〇基の原子力発電所の運転が一年可能となる。これは世界の軽水炉の一年分の燃料の約半分で、それほどの量にならないことは明らかである。軍事用プルトニウムが不要になるためこれを平和転用すると長期間にわたる燃料となると考えるのは明らかに誤解と言わざるを得ない。

使用済み燃料を再処理して再利用しないとすると、プルトニウムを含む物質をどう処分するのかが課題となる。再処理を認めない立場は、再利用の経済性が不満足なことよりも、むしろ核兵器への転用の怖れをなくすことにあるので、使用済み燃料に多くの加工をしないで人類環境と自然環境から十分隔離できなければならない。再処理後の高レベル廃棄物はガラス固化体にする等放射性物質の移動性を極めて低くして環境からの隔離を図っていることと比較しても隔離自体に困難さを伴うほか、見方によれば未だ十分価値を持つものであるから意思が働けば再び掘り出して転用を図ることも考えられる。この可能性をなしとする楽観的立場に立てるとすれば、これは同時に現在の再処理路線をも同様に肯定することになるのではないか。使用済み燃料を再処理しないで廃棄する立場は、宇宙空間や星、例えば太陽に打ち込むことでも考えないと論理的優位性が出てくるとは考えにくい。また使用済み燃料を再処理しないで処分する方法を選択することは、原子力の利用の結果天然ウランの持つ放射能以上の使用済み燃料の放

射能を自然界に戻すことにもなる。

第二章
原子力の整合性

3　調和ある原子力システム

原子力開発の整合性

原子力開発のタイムスパン

原子力を総合科学技術として位置付ける場合でも、その一つの中心となるのはエネルギー開発である。ところが、世界政治の観点からは、プルトニウムの核兵器転用の心配から原子力のエネルギーとしての開発にモラトリアムを求める論議や、すでにモラトリアム状態に入っている国もある。しかし、将来に多くの可能性を持ち文明を支える能力を持つ原子力のある部分、それも基本的な特徴であるエネルギー開発の部分を最初から否定してかかることは率直に言って間違いだろう。原子力開発の長期的視点と、現在の世界政治が直面している問題とを十分整理して理解しておくことが今後の原子力の順調な発展のために望まれる。

アメリカはカーター政権以来、国として原子力の長期展望を持っていないように思える。原子力開発に対する姿勢については、レーガンやブッシュの共和党政権とカーターやクリントンの民主党政権の間に相当な差があったと考えられるが、全体的に時代とともに原子力は活気を

無くしていっていることは看過できないことである。また、社会全体として、思考や価値判断のタイムスパンが短くなり、原子力を含む理工系分野に若者の夢を引き付けられなくなっているように思える。この二〇年以上にわたってアメリカが掲げた大型科学技術プロジェクトは核融合、加速器SSC、高速増殖炉クリンチ・リバー等々あるが、その多くは途中で計画の変更又は中止の憂き目を見ている。中でも原子力開発について民主党政権のプルトニウムに対する姿勢は厳しく、カーター政権の時代から核拡散に対する世界的ルール作りも含めて、その象徴的存在であるプルトニウムに対する厳しい考え方を自国だけでなく、他国にも強いている。

もちろん、日本に対しても例外ではない。この姿勢は資源小国の認識のもとにプルトニウムを技術制約型のエネルギー源として積極的に開発を行おうとする日本の姿勢とは相容れないものがあるように思える。また、一九九二年秋に開催されたアメリカ原子力学会とヨーロッパ原子力学会共催のシカゴパイル五〇周年の記念大会でも米、欧、露、日の世界の原子力先進四極の代表が科学技術的立場からいずれも二一世紀における高速増殖炉の開発とプルトニウム利用の重要性に言及したのを見ても、長期展望に立てばプルトニウム技術の開発を否定することは二一世紀における重要なエネルギーオプションを放棄するにとどまらず、原子力文明の正常な発展を妨げることにもつながっていくことになろう。これは正に原子力の長期展望と現実の世界政治との相互干渉と見るのが正確であろう。あるいは政治の抱えるタイムスパンと原子力の長期展望の持つタイムスパンとの違いが現実に表れたものであろう。このことは単にアメリカ

とか日本とか特定の国の問題でなく、二一世紀に生きる世界の国々にいずれも密接な関連を持つものと理解しておく必要がある。

世界がプルトニウムという優れたエネルギー源になる可能性を持つ物質を、重要なエネルギーオプションとして原子力開発の長期展望の中に取り入れないことはどう考えても説明できることではない。

長所追求からバランス優先へ

エネルギー開発を原子力開発の一つの中心として認めるためには、当然ながら原子力システムの整合性が要求されることになろう。

従来の「利用」を主眼にした原子力開発を二一世紀以降の社会が受け入れるとは限らない。人類社会や自然環境との「調和」をより高位の理念にした原子力システムの概念を創出し、この理想的な原子力システムを長期展望の中に位置付け、科学的可能性の検証とそれへ向けての技術的アプローチを社会に示して、初めて社会は原子力システムが自ら整合性を持っていることを認知し、その研究開発を容認することになろう。

原子力もこれまで従来の科学技術開発と同様、プラス面を強調してそれを利用する立場から開発が進められ、原子力の持つエネルギーが電力の形で利用できることを示す一方、社会導入の条件として安全の確保が最優先課題として開発の中心に位置付けられた。これが社会に「原

子力その必要性と安全性」をキャッチフレーズとして原子力発電を訴えてきた理由だろう。
原子力開発は、見方を変えれば軽水炉を中心とした原子力発電を社会に導入し、定着を図る一方で軽水炉の改良を含めてより良いものを求めて研究開発が進められてきたとも言える。軽水炉については安全上の課題の解決だけに限らず、新しい概念を導入して大型化や高性能化を進めてきて、現在ほぼ完成された熟成技術の段階に入っている。軽水炉に続くものとしての新しい概念は原子力を更に効果的に利用しようと考え、エネルギーの有効利用、資源の有効利用を図るとともに原子力の応用範囲の拡大を図ってきた。例をあげると原子力の化学エネルギーへの変換等多目的利用を図って高温良質のエネルギーを得るほか、高い熱効率を望んで開発が進められてきた高温ガス炉はエネルギーの有効利用に中心目標を置いた開発であったし、高速増殖炉はプルトニウムを生産しながらプルトニウムを燃料として発電を行うといった原子燃料の有効利用と言うか、資源の有効利用を中心目標にした開発であった。

このように、これまでの原子力開発を端的に表現すれば「長所追求型」であり、「利用目的強調型」と言えよう。しかし軽水炉による原子力発電が世界の主流となり、全世界の電力の一七%程度、日本で三〇%程度となり、原子力の光は光であることを実証している一方、影の部分も存在している。影を消す努力は安全確保技術の開発であり、高レベル放射性廃棄物の安全な処理・処分の技術開発であった。軽水炉の安全確保の実績はこれまでに環境や住民に放射線

に関係した災害をもたらすことなく、また、放射性廃棄物の処理・処分についてはガラス固化を中心とした技術開発が続けられている。

しかし、このような光と影を対比させるような思考で課題を個々に解決しようとする方向の研究開発から「自ら整合性あるシステム」に到達するのは必ずしも容易ではない。むしろ原点に帰って原子力のあるべき姿を求めて、理想の原子力システムの概念を想定し、その科学的可能性を検証することから出発して長期展望を行う中で、技術開発の目的と目標を明確にすることが望ましい。更に個々の目的を具体化し、人類社会や自然環境との調和を図りながら整合性のある原子力システムの研究開発を継続していくことが期待される。従って「自ら整合性ある原子力システム」のような概念は正に原子力開発を「利用から調和へ」と発想の転換を図る上で最もアピールするものであると言える。

「自ら整合性ある原子力システム」の科学的可能性から技術的実証性へ向けての研究開発の指標は核分裂で生まれる中性子の数のバランスとエネルギーのバランスから求められる。エネルギーと中性子双方のバランスがとれれば整合性の要件がすべて同時に達成できることを示すことができる。

整合性の要件

エネルギー源の量と質

将来のエネルギー源として可能性を持つものが自然の原子力である太陽と、人工の原子力すなわち核分裂および核融合であることはすでに述べた。しかし、将来の人類社会に貢献するエネルギー源として認知されるためにはいくつかの要件を満足しておく必要があろう。

人類はこれまで尽きないエネルギー源を求めてきた。化石燃料についてもこれまで石炭、石油、天然ガスと、時代とともに主体となるエネルギー源は変化してきた。

アイゼンハワーの「平和のための原子力」は十分な技術の裾野があればこの高度な技術に制約されるエネルギー源を開発でき、その扱い方によっては地域制約、資源制約から解放された長期にわたるエネルギー源として位置付けられることを示し、先進諸国はこぞって原子力の研究開発に積極的に参画した。

原子力が長期にわたって人類文明をその根幹で支える総合科学技術として成長し、エネルギー源としても人類社会に貢献できるための要件の第一はエネルギー源の量と質である。原子力エネルギーは汎用性を持ち、高性能、高効率の利用が期待できる。このためには技術の側からの主張だけでなく、社会環境との調和を考えて社会の要求に応えながらその特徴を生かすこと

が望ましい。二一世紀の人類社会がその平和と豊かさの確保のためにどのような社会形態を望み、どのようなエネルギー供給を求めるかを理解し予測しておくことはエネルギー開発の重要な視点である。平和維持の立場からは、地球上でその資源・原材料が偏在していることはそれらの調達がその輸送性、備蓄性に加えて政治情勢に大きく支配されることや、最悪の場合には資源を求めての国際紛争や戦争をもたらしてきたことも過去の事実であり、このような偏在性に左右されにくいことが望まれる。

現在の原子力開発の中で、わずかにエネルギー生産だけしかその実用化に成功していない。それも軽水炉を例にとると、温度にしてたかだか三〇〇度C位の蒸気に換えてエネルギーを使っている。本来、核分裂反応に際して放出される超高エネルギーは、これを温度に換算すると極端に高い温度になるわけで、その方向すなわち高温化、高効率化へ向けての技術開発の必要がある。原子力も次のステップを考える時期が近づいているように思える。エネルギー源としての原子力はこれまで軽水炉に代表される原子力発電が、ともすれば集中型大規模システム化へのプロセスをたどってきており、今後の目標の一つは変換効率の増大にあることは当然である。しかも、今後は更に汎用性あるエネルギー源としてエネルギー生産と使用を調和させていく側面が出てくることが考えられる。これから日本でどこに原子力発電所をつくっていくかということを考えた時に、集中大型だけでは対処できない時代が来ることを認識しておく必要がある。

第二は人類のエネルギー需要を長期にわたって満足させるだけの資源が確保されることである。資源論的に見れば、原子力はウラン238やトリウム232のように天然に存在する元素をプルトニウムやウラン233のような原子燃料に転換することによって大幅にそのエネルギー量を増大することができるとともに、低質の資源や海中の資源をも燃料に変えて使用できることが分かっていた。プルトニウムを積極的に生産し、人類に半永久的なエネルギー源を供給しようとする高速増殖炉開発は人類の夢を実現するものとして期待され、原子力開発の長期展望の中に位置付けられ「夢の原子炉」と呼ばれ若者の夢を支えてきた。

環境適合性と安全

第三は、現在の人口、エネルギー、環境が抱えるトリレンマ解消の課題の一つが環境保全と環境改善であり、今後のエネルギー源には当然のことながら俗に「地球にやさしい」と表記される安全性を含めた環境適合性が求められる。硫黄酸化物、窒素酸化物、炭酸ガス等の放出の無い、環境に悪影響をもたらさない性質に加えてエネルギー利用効率の高い原子力システムが導入できれば人類文明を支えるエネルギー源としての確固たる位置付けができよう。

環境適合性の多くは排出側の問題に帰着されることが多いが、資源の採取側の問題も同時に考えておくことが必要である。資源の取得から最終的利用に至るプロセスは資源の種類、性質、

利用形態によって相違はあるが、化石燃料と原子力とを問わずエネルギーの流れ、物質の流れを扱うことでは議論の共通点があり、利用の結果、何が環境に負荷として残されるのかを具体的に示すことによって評価が行える。このような議論を通じて「利用から調和へ」の発想の転換を図っていくことが重要である。排出側の問題は常にエネルギーと物質両者の排出に関連している。この両者は通常時と異常時に分けて議論されるのが普通である。

通常運転中にも環境に排出される物質はある。これまで経験した公害問題の多くが、窒素酸化物、硫黄酸化物を代表にしてエネルギーシステムとしての自動車や火力発電からの排出物であったが、それ以外の産業においても有害な排出物、例えばカドミウムや有機水銀等の重金属に起因する公害があったことはよく知られているところである。このような排出物に対しては発生源をなくしたり、発生量を減少させたりするほか、発生した排出物をシステムの内部に貯蔵することで環境との間に離隔を図ってきた。公害防止産業と呼ばれるものの多くがこのように排出物の減少や環境からの隔離を目的としたものであったが、エネルギーシステムにおいては排出側の問題の解決を図るほか、省エネルギー技術を開発してきた。これは利用側の変換効率を高めることや無駄なエネルギー消費を減少させることによって反応に参加する原材料を減少させることであった。しかし、炭酸ガスの場合、省エネルギー対策やエネルギー源の代替によって発生量を減少することは考えられても、ひとたび反応した場合、発生する炭酸ガスの排

出は制限できないと考えた方がよく、一〇〇%放出が前提になる。

こうした中で炭酸ガスの温室効果による環境影響が予測されるようになり炭酸ガスも有害物質として検討対象となってきた。環境税とか炭素税とかを課することによって化石燃料の使用量の減少を経済の観点から図ることを考えているが、エネルギー源の変更以外に抜本的解決策は見出だせない。これに対して、原子力は放射性物質の放出のないこと、すなわちゼロ・リリース（無放出）を究極の目標としている。また、現実に原子力発電所での通常運転時の放射性物質の放出は自然放射線レベルに比べても無視しうるほどである。

更にエネルギーの利用に伴って生まれる廃棄物や安全上のキーとなる物質の中には環境と隔離して保持しようとするものがある。原子力の放射性廃棄物や廃炉の問題がこれに当たる。このようなエネルギー利用が結果として環境に与える影響は現実的には緩和する方向で解決できることになるかもしれないが、原子力発電所の廃棄物が何故生み出されるかを考えると、これは原子炉の中で運転とともに放射性物質が原子核反応によって生み出されるからである。発想を転換して考えれば原子炉の中で放射性物質が生まれるならその放射性物質を原子炉の中で再び反応させ、放射能のない元素に換えてしまうことに目がいく。原子炉の中でウランやプルトニウムが燃えたり、超ウラン元素になったりすることによってどんな放射性物質が生まれてくるかはすでによく分かっている。このような元素を再び核反応させて非放射性元素に転換することができる。すなわち放射性物質を原子炉の中で消滅させることが可能になる。

第四は安全の確保である。安全の基本はエネルギーの異常放出を防止することにある。エネルギーの異常放出は事故の誘因であり、事故に伴ってシステムが内包する有害物質が放出される可能性がある。原子力の安全は、正にエネルギーの異常放出が誘因となってもたらされる放射性物質の環境漏洩の可能性を基本的に扱い、システムに固有の性質や工学的な安全機能によって漏洩を防止あるいは局限し、環境影響を事実上なくす方向への努力である。原子力に限らず化石エネルギー利用施設、例えば火力発電の世界にも安全問題はあり、自然エネルギー利用設備、例えば水力発電でも事故は経験される話である。しかし、原子力開発に当たって安全の確保が最優先の課題として取り上げられ、他の産業技術にそれまでに見られなかった安全論理を構築し、事故を未然に防止し、万一の異常発生に際してもその拡大を抑制し、かつ影響を緩和する安全技術が研究・開発されてきている。

整合性の四要件

これまで述べた第一から第四までの要件を理念的にまとめて整合性の要件を定義し、それに向けての科学的可能性の検討と技術開発のシナリオを準備しておく必要がある。地球上に住む人類にとって変えることのできない自然法則、例えば熱力学の法則等があるが、エネルギーの有効利用に関してはその範囲内での変換効率の向上に対する努力が求められることになる。最

終的にはエネルギー利用の制約は資源の枯渇よりも、廃熱の限界によって決まるだろう。

エネルギーシステムとしての原子力は、原子力発電を中心にしながらもそれ以外に将来種々の応用形態が考えられているが、その基本理念は原子核の内部に潜むエネルギーを取り出し、人類社会の平和と豊かさを維持するのに貢献するものである。原子核と放射線の反応の持つ基本的特徴を捉え、更に反応に伴って放出されるエネルギーと、反応によって転換された元素や物質のことを考慮に入れた整合性の要件を四点に絞ることができる。（図7）

この四つの要件を同時に満足する原子力システムを「自ら整合性ある原子力システム」と定義する。もちろん、現在このようなシステムは化石燃料では望むべくもない概念である。

自ら整合性ある原子力システム

科学的可能性のシナリオ化

原子力に対する社会の批判に答え、原子力がエネルギーシステムとして十分整合性を持ち得ることを証明するのに第一に重要なことは、科学的可能性の検証である。

「自ら整合性ある原子力システム」概念の構築に当たって重要なことは、サイエンスの世界で理念をシナリオとして成立させることである。サイエンスの段階、すなわち科学的可能性の

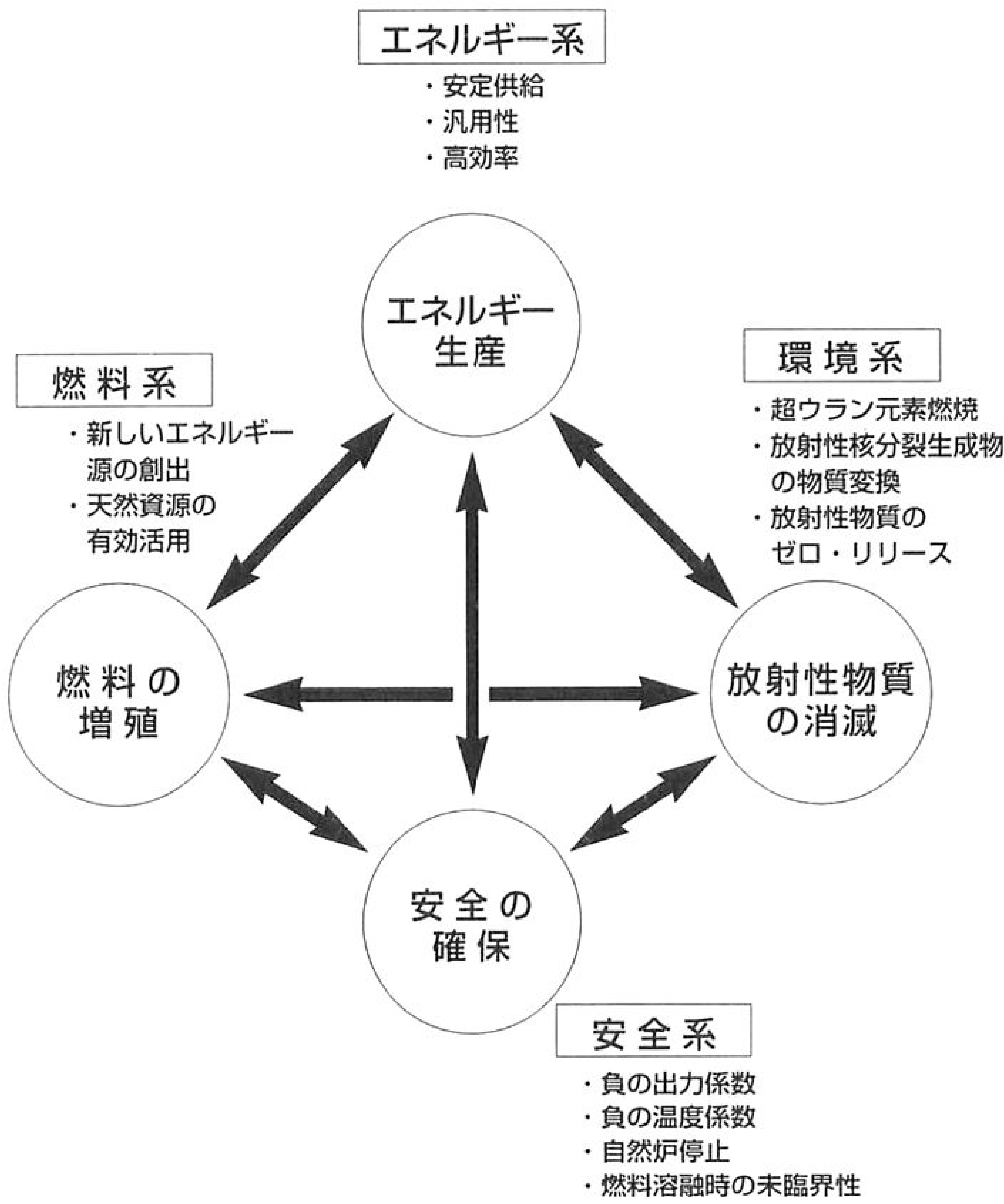


図7　整合性の要件と究極の目標

証明は整合性の四つの要件を、一つには核分裂に際して生まれる中性子の数のバランスで成立させ、次には核分裂で発生するエネルギーでシステム構成に必要なエネルギーを十分まかなえることを示すことである。

「自ら整合性ある原子力システム」概念を端的に表現すれば、原子核の中に潜むエネルギーを最大限に引き出し効率よく使用する一方、有害物質である放射性物質をシステム内に閉じ込め、システム内で消滅することを原則としたものであり、「調和」を「利用」より高位の理念としている。整合性の第一、第二の要件はエネルギーの最大限の引き出しと高効率利用に直接関連したものであり、第三、第四の要件は放射性物質の無放出すなわちゼロ・リリースの原則に関連したものである。これらは原子力システムの究極的な姿に求められる最低条件を示したものであり、この原則なり理念はまずその可能性を科学的に検証する必要があり、科学的に可能性ありとされる場合は技術的観点からその実現性についてみておく必要がある。

「自ら整合性ある原子力システム」の概念は、図8に示すように天然ウランをシステムに供給することで原子核変換を行い社会に有用なエネルギーと元素を提供することを目的としている。一方、原子核変換で生まれる放射性元素は有用なものを除いてシステム内で更に原子核反応によって安定な非放射性元素に変換するものである。このような一連の原子核変換を通じて元素が変換され、エネルギーが解放される。エネルギーについては有効エネルギーとして発電

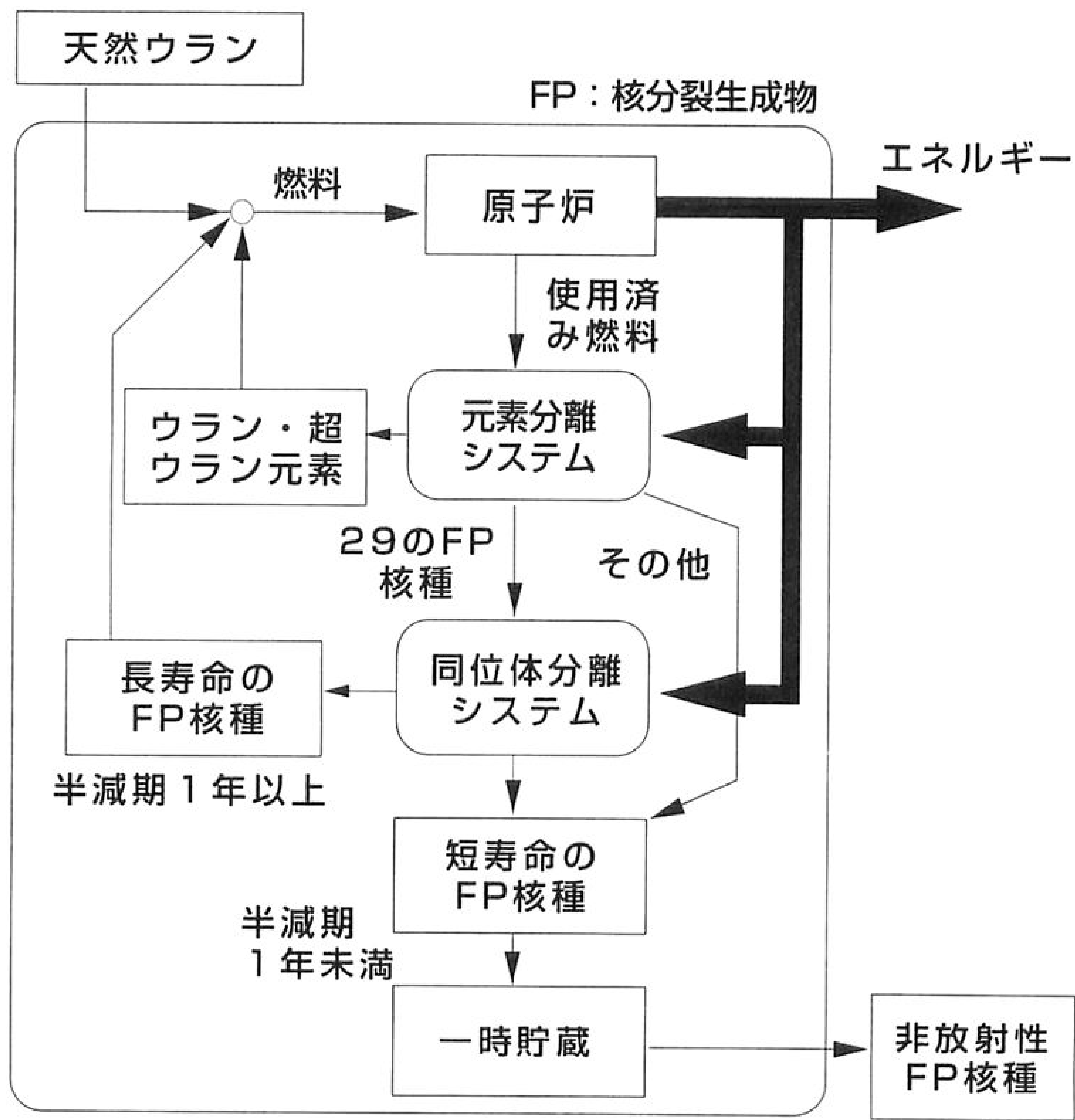


図８　自ら整合性ある原子力システム
物質とエネルギーの流れ

等に使われるものや核燃料サイクルで元素の分離や混合に使われるエネルギーのほかは無効エネルギーとして環境に放出される。この際、無効エネルギーが生じることは程度の差こそあれ熱力学の第二法則により避けられないもので、エネルギー利用効率を向上させることで無効エネルギーの低減を図ることになる。火力発電や原子力発電で温排水と呼ばれるものは無効エネルギーの一つの形態である。

天然ウランは中性子を吸収してそのまま核分裂するか、あるいはプルトニウムのような超ウラン元素となり、これが再び核分裂して次第にシステムの中で核分裂生成物に変わっていく。核分裂生成物の多くは放射性物質で、これも中性子を吸収して非放射性元素に変換されていく。このように「自ら整合性ある原子力システム」は天然ウランを燃料物質に変換し、その後核分裂させてエネルギーの有効利用を図るとともに放射性物質の放射能を消滅させていこうとするものであり、整合性の三つの要件を満足させる。更に安全についてはエネルギーの異常解放を防止する一方、万一の異常解放に際しても放射性物質の環境への放出を防止する。

このように「自ら整合性ある原子力システム」内部には当然放射性物質は存在しているが、環境に出さないことが基本的目標の一つである。このようなシステムが完成すれば天然に存在するウランの放射能を人工的に減少させ、消滅させることのできるシステムと考えることができ、原子力システムが放射性物質を生み出すのでなく、自然の放射能を減少させる能力すら持

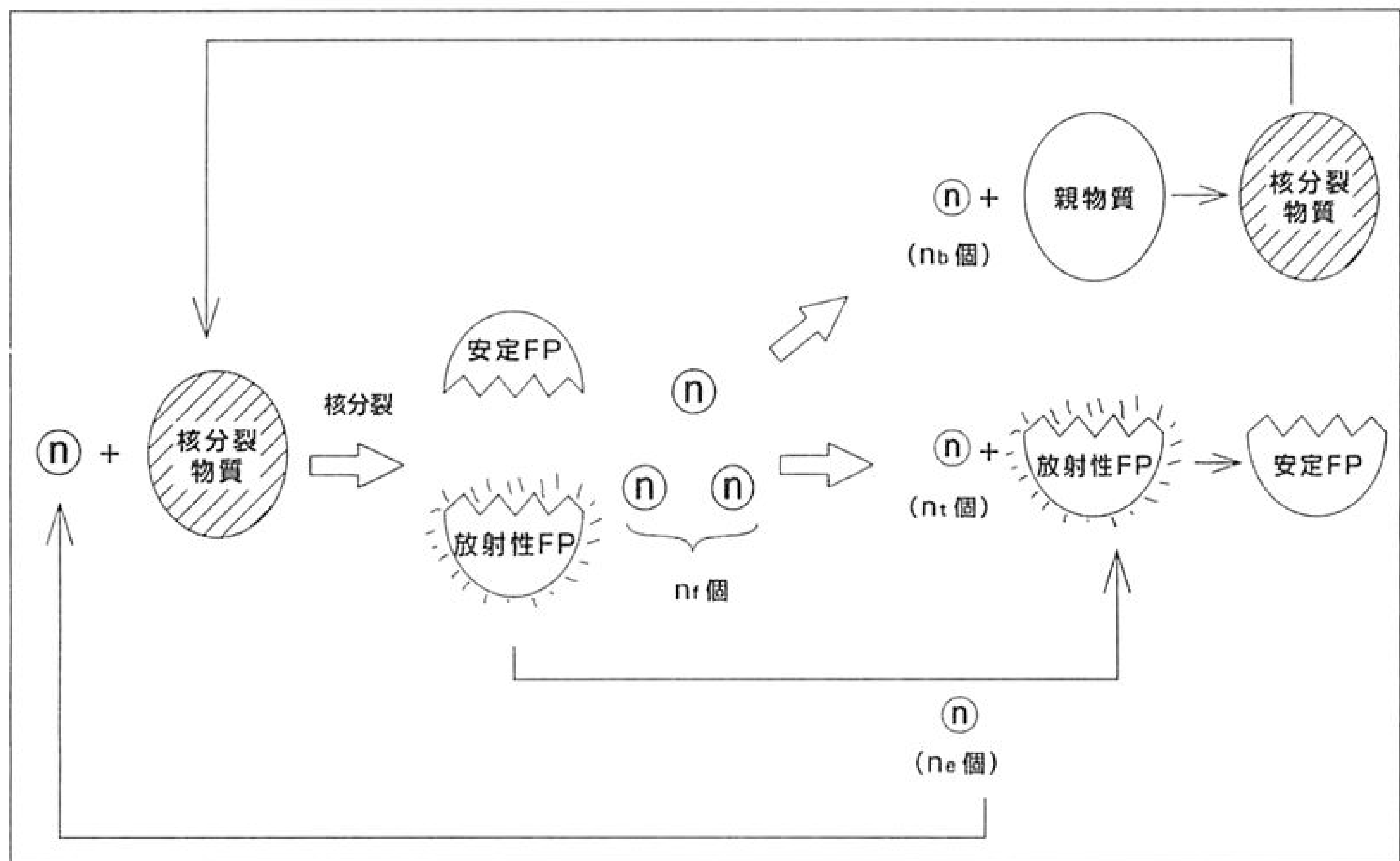
ち得ることをも示すものである。しかし自然界の放射能が減少する方がよいとは一概には言えず、これは可能性の問題と考えておくべきことである。

科学的可能性は原子炉の心臓部である炉心での中性子と原子燃料との反応、すなわち中性子と原子核の反応という原子力の定義そのものを調べることによって検証される。中性子と原子核の反応はそれほど多くの種類があるわけでなく、中性子による核分裂、中性子の吸収、中性子の散乱および炉心の外へ逃れ出る漏洩とである。この四種類の現象がどのように起こるかを見ておけばよい。（図９）

中性子の運動場

整合性の要件が満せるかどうかの検討は、原子炉にどんな元素（物質）をどんな組成でどのように空間配置するかの問題を検討することに帰着する。原子炉は中性子にとって運動場であり、整合性のある原子炉になるような運動を中性子に期待することになる。

中性子に多くの役割を期待するには第一に中性子の数を増やすことが先決である。ウランにしろ、プルトニウムにしろ、核分裂を起こすと同時に複数の中性子を放出する。核分裂当たりの放出される中性子の個数は中性子のエネルギーが大きい、すなわち高速中性子による核分裂の方が多くなる。更にウランやプルトニウムのような核分裂性物質が中性子を吸収して核分裂せず、他の超ウラン元素に転換される割合も高速中性子の方が熱中性子より少なく、整合性の



整合性の科学的可能性
$n_f > n_e + n_b + n_t$ ---------- 可能性あり
$n_f < n_e + n_b + n_t$ ---------- 可能性なし
n_f：核分裂中性子の数
n_e：エネルギー生産に要する中性子の数
n_b：燃料増殖に要する中性子の数
n_t：放射性物質の消滅に要する中性子の数

図 9　核分裂中性子の配分／整合性の科学的可能性の検証

要件を満足する上で有効である。従って整合性の要件を満足するには高速中性子の運動場である高速炉が望ましい。

次に、この豊富な中性子に期待するのは核分裂によるエネルギーの発生と新しい原子燃料の生産である。核分裂によってエネルギーを放出するもの、すなわち核分裂性物質としてはウラン233、ウラン235およびプルトニウム239等の超ウラン元素がある。このうちウラン233とプルトニウム239は天然にはなく、人工元素としてトリウム232やウラン238が中性子を吸収して核転換の結果つくり出される核分裂性物質である。このように核転換によって新しく燃料をつくり出すことができるのが原子炉の特徴である。核分裂に限らず核融合の場合もリチウム等からトリチウムをつくって燃料として使用することを考えている。「自ら整合性ある原子力システム」では、プルトニウムをはじめ超ウラン元素は原子炉の中で燃料として利用することを考えている。超ウラン元素は高レベル廃棄物とせず、原子炉の中を再循環させ燃料として核分裂させることが「自ら整合性ある原子力システム」の基本的特徴である。

一方、超ウラン元素と同様、核分裂の結果生まれる核分裂生成物もその多くは放射性物質である。一般に放射性物質はそれぞれの固有の半減期で減衰していくが、中性子を吸収して別の元素に変換することによってそれより早く放射性をなくすか、あるいは半減期の短い元素にすることができる。このようにすれば放射性物質は減衰または消滅していき、放射性物質の持つ潜在的危険性が長期に継続することを防止できる。このような放射能の減衰や消滅も原子炉の

中で起こすことを考えている。更に原子力システムの中に存在している放射性物質については当然安全を確保することでその放出を防止する。これもまた「自ら整合性ある原子力システム」の特徴である。

整合性の条件は、安全を別にすると連鎖反応の継続に必要な中性子を第一の目的に、一個あるいはそれ以上の核分裂性物質を生み出すのに必要な中性子を第二の目的に、放射性物質を基本的に消滅させるのに必要な中性子を第三の目的に配分することによって達成される。

科学的検証とはこの三つの目的に配分する中性子の数の和が一回の核分裂によって放出される中性子の個数以下になることを示すことである。すなわち中性子がその役割を完全に果たすことができることを意味している。この科学的可能性は未だ明確な形では検証されていない。「自ら整合性ある原子力システム」は、例えば天然ウランを燃料とした原子炉から出発して原子炉の中で自然にプルトニウムをはじめ超ウラン元素が生まれ、それがそのまま次に核分裂を生じて核分裂生成物に変わる。また、核分裂の結果生まれた核分裂生成物も原子炉の中で中性子を吸収して次第に非放射性物質に変わっていき、自然に整合性の要件が達成されるという簡単なことにはならないだろう。もちろん、プルトニウムの生産も放射性物質の消滅も部分的には起こるが、それだけでは全体として整合性の要件を満足することには決してならない。恐らくこのようなアプローチでは難しいと考えられる。

整合性検証の指標

このような科学的可能性の検証の上に立っての技術開発は原子炉の構成材料の選択とその空間配置の問題に帰着されることになろう。整合性の要件を満足させるための炉心構成を科学的検証の点から見て、何が必要なあるいは対象となる元素かというと、ウラン233、ウラン235あるいはプルトニウムのような核分裂性物質としての燃料、次いで新しく燃料に転換されるトリウムやウラン238、更に原子炉の中で生産される超ウラン元素と核分裂生成物とがある。更に必要に応じて構造材や原子炉で発生した熱を除去するための冷却材、軽水炉のような熱中性子炉では減速材等が加えられる。これをどのように混ぜ、あるいは分離して空間的に配置すればよいかの話と、これらの材料が果たしてうまく混合または分離できるかの話とがある。前者は原子炉の話、後者の中心は使用済み燃料の処理を含む燃料サイクルの話である。このような観点に立てば燃料サイクルに対する条件は従来の純粋なプルトニウムを高い精度で分離しようとする目的のものとは基本的に異なるものとなり、必ずしもすべての材料を精度よく分離精製することが前提にはならない。

原子炉については中性子の数のバランスを考えながら原子炉の大きさと構成材料の空間配置を考えることになる。中性子の数の配分については最低限、核分裂の連鎖反応継続のために一個、燃料生産のために一個の中性子をあてがって、残りの中性子で超ウラン元素や核分裂生成

物の放射能消滅が可能かどうかを調べることである。燃料サイクルでは元素や同位元素を適切に分離、混合することが主要な課題で、ここにどれだけのエネルギーが必要かを見積もることで科学的可能性は検証される。すなわち核分裂一回について出てくるエネルギーで、超ウラン元素や核分裂生成物の分離や混合に必要なエネルギーがまかなえるかである。

「自ら整合性ある原子力システム」構築の科学的可能性は、このように原子炉については中性子数のバランスが主要な指標となり、燃料サイクルについては材料選択に必要なエネルギーが核分裂によって得られるエネルギーに比べて小さいというエネルギーバランスが主要な指標となる。中性子の数とエネルギー収支、この二つが整合性検証の指標である。

科学的可能性の検証

思考実験からの出発

話を簡単にするために次のような仮想的原子炉から出発する。最初、天然ウランすなわちウラン235が〇・七%、ウラン238が九九・三%の原子炉を考え、その中で天然ウランと高速中性子が反応を続けている。天然ウランに中性子が吸収されると超ウラン元素が生まれ、核分裂を起こすと核分裂生成物と中性子が生まれる。また、天然ウランに中性子が跳ね返されると中性子

のエネルギーが変わる。もちろん、実際の原子炉では冷却材や構造材等も原子炉構成要素として不可欠であるが、中性子バランスを考える点から必要なことは、天然ウランおよび超ウラン元素等科学的可能性検証のキーとなる元素に限って考えることにし、これらの元素と高速中性子の反応によって生まれる中性子と、吸収される中性子の数を知ることである。このため、最初はこのような原子炉構成材料は無視した原子炉を考えている。また、ここでは中性子は原子炉の外へは逃げ出さないと仮定している。中性子との反応で生まれた超ウラン元素は原子炉の中にとどまって、更に高速中性子と反応を続けるが核分裂生成物は生まれると即座に原子炉の外に出され、それに見合うだけの天然ウランが供給されると仮定する（図10）。この仮定は原子炉の質量バランスを成立させ、平衡状態を求めるために必要である。従ってここでは核分裂生成物と高速中性子の反応については無視している。これについては、科学的可能性検証の点から後で考えることにする。また、核分裂で生まれるエネルギーも外部にそのまま取り出されるとしている。

さて、ここで中性子がその運動場である原子炉の中で吸収、核分裂、散乱等の反応を続けていくと、原子炉の中のウランや超ウラン元素の組成は一定に近づき、原子炉の出力も一定になり平衡状態に達する。このような平衡に達した時の元素の組成とこれらの元素の生成する中性子数と吸収する中性子数を求めることで中性子の数のバランスを知ることができる。

計算によると一回の核分裂当たり生まれる中性子の個数は約二・九五個、一方、核分裂や燃

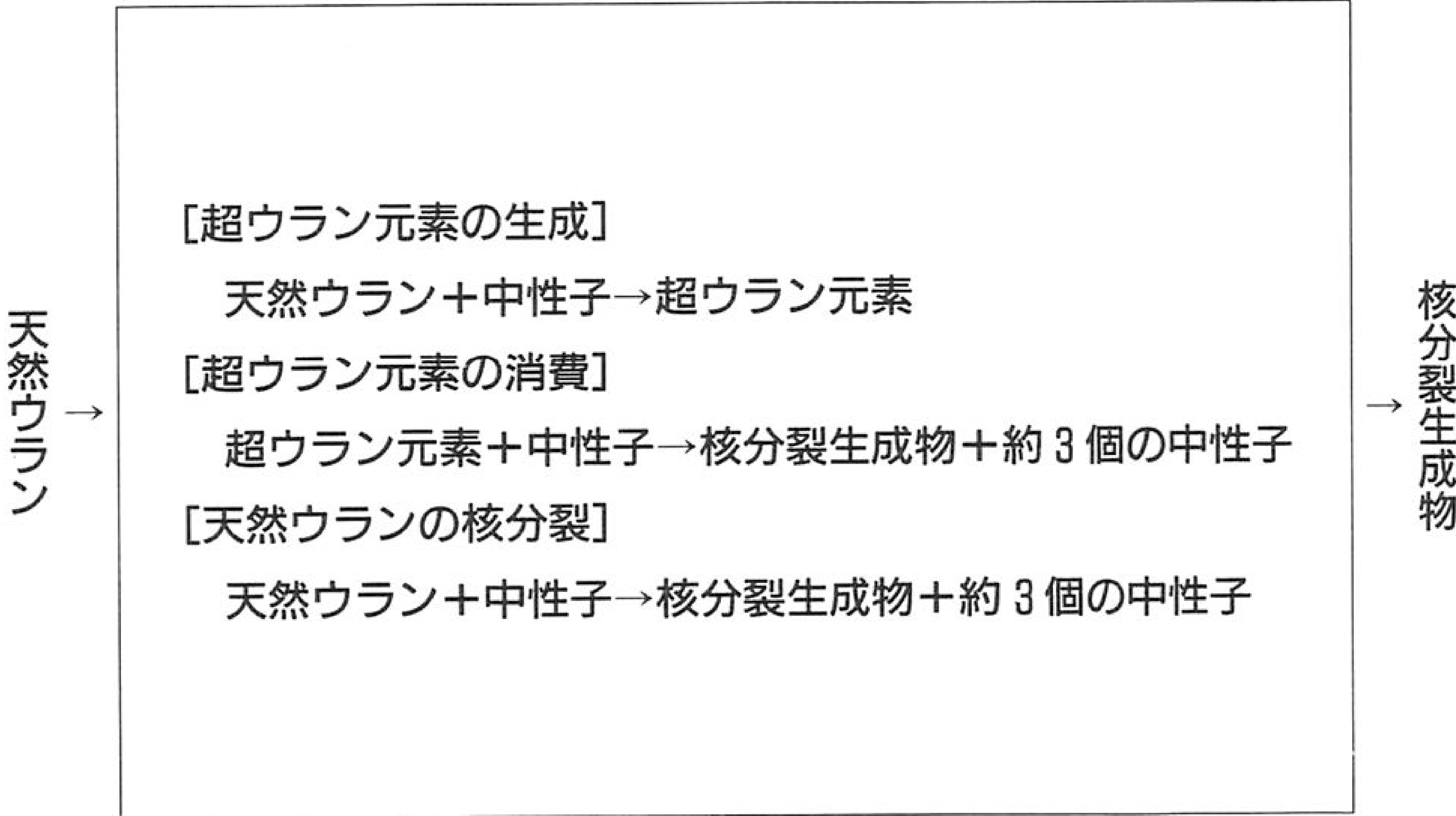


図10　原子炉内部での核反応

料生産や吸収等、ウランや超ウラン元素によって消費される中性子の個数は約二・二二個。よって一回の核分裂当たり約〇・七三個の中性子が正味残ることになる。ここでは超ウラン元素はすべて燃料として同等に扱うことにする。特定のものを選択的に分離して扱うことはしない。このような燃料サイクルについての議論はすでにある。

放射能消滅の可能性

このような平衡状態を実現させてやれば、ウランや超ウラン元素の放射能も一定に保たれる。すなわち、生まれる放射能と消滅される放射能の量が一定になっているので原子炉の中でこの種の放射性物質の量が増大することにはならない。従って、超ウラン元素の放射能消滅は行われていることになる。

ここで更に核分裂生成物の放射能が消滅できるかを考えることにする。核分裂生成物として原子炉内で生まれる元素のうち、半減期が一年以上の放射能に関連したものが二一種あり、同位体まで考えると二九種ある。これら以外にも半減期が一年未満の元素があるが、すぐ安定な放射能のない元素に自然に変化するので、ここでは特に考えないことにする。さて、この二一種類の核分裂生成物をすべての同位体元素も含めて原子炉の中に入れたままでいると、放射能の消滅以外に非放射性の元素までも中性子を吸収し消費することになるので必要な中性子数は約一・一二個にもなり、余分の中性子〇・七三個のすべてをこのために費やしても中性子が不

足することになり、すべての放射能を消滅する科学的可能性はないと言える。

この場合、「自ら整合性ある原子力システム」は基本的に不可能になり、ガラス固化体等の技術開発によって高レベル放射性廃棄物の地層処分等の現実的な解決策を講ずる必要が生まれてくる。しかし、目的は放射性物質の消滅にあるので、放射性同位体のみを対象とすればよい。例えば放射性同位体を含む核分裂生成物を原子炉内から一度取り出し、その中から放射性同位体のみを選んで原子炉内に戻せばよい。つまり元素分離に加えて同位体分離を行って、化学的な性質が同じでもそのうち放射能のあるものだけを原子炉内で消滅し、中性子の負担を減らすことができる。このように化学分離に加えて同位体分離を行うとすべての放射性同位体の放射能消滅に必要な中性子の数は約〇・二五個になり、余った中性子数〇・七三個より十分少なく、科学的にはすべての放射性物質を消滅できる可能性が生まれる。

更にこの差、約〇・四八個の中性子は放射性物質の消滅以外の目的に使うことができるが原子炉の構造材や冷却材によって吸収される中性子があり、その数は、大まかな計算によると約〇・二二個と見積もられる。また、原子炉の中で生まれた核分裂生成物を瞬時に炉の外へ取り出すことは技術的には難しく、いくらかの滞留時間は必要となる。この間に中性子が余分に吸収されることは当然考慮しておかなければならない。更に原子炉の大きさが有限であるための中性子の漏洩等のことを考える必要もある。

このように、技術開発の中でどれだけ中性子に余裕をみておかなければならないかを考える

と、「自ら整合性ある原子力システム」を技術的につくり上げて行くのは十分可能性を持つものの、関連技術開発が重要になってくる。「自ら整合性ある原子力システム」においては、超ウラン元素や核分裂生成物を含む放射能の強い高レベル放射性廃棄物は基本的に生み出されないことになる。

原子炉でこれ以外の放射性物質としては原子炉の構造材や冷却材等が中性子を吸収して生まれるものがあり、廃炉に際してあるいは低レベル放射性廃棄物として扱われることになるがその放射能の強さおよび半減期は前者に比べて小さく、将来的には材料の再生利用の観点からの有効活用を中心に問題の解決が図られることになろう。

さて、中性子の数のバランスだけでは不十分である。当然のことながら元素や同位体を分離するにはエネルギーが必要になる。元素が違うとその化学的性質の違いに着目した分離、いわゆる化学分離が可能であるが、同位元素は化学的性質が同じなので質量や励起エネルギーのわずかな差に着目した分離方法になる。原子力の世界では、同位体分離にはガス拡散による分離、遠心分離あるいはレーザーによる分離等があり、ウラン濃縮技術として開発されてきた。

化学分離と同位体分離にどれだけのエネルギーが必要か。核分裂一回当たり生まれる放射性物質の分離に必要なエネルギーの総和が、一回の核分裂で出てくるエネルギーより十分小さくなければエネルギーシステムとしての意味はなく、整合性の成立条件は満足されないことにな

る。

それでもエネルギーシステムとして役立てようとすると、前述のように現在研究開発を進めている高レベル放射性廃棄物の地層処分のような事実上の安全を目指した処理・処分のための技術開発へと向かわざるを得ない。しかし、同位体分離に必要なエネルギーは、基本的には化学エネルギーの領域で殻外電子の分離エネルギー、すなわちイオン化エネルギーが一つの目安となり、原子核の結合エネルギーの一〇〇万分の一以下になり、相当小さい。効率を考えてもそれ程の大きさにはなりそうにない。事実、おおざっぱな計算でも核分裂エネルギーのうち化学分離に約〇・五%、同位体分離に約一%程度のエネルギーが必要とされる。この評価に当たっては化学分離も現在のようなものではなく、例えば乾式再処理（図11）のような新しい方法を想定し、後者はハイテクのレーザーを使った同位体分離（図12）を想定している。これで十分エネルギー的にも整合性の条件を満足することが分かる。これで科学的可能性は検証された。あとはこのシナリオに沿って技術開発を進めていくことが必要になる。

自ら整合性ある原子力システムの実現性

さて、「自ら整合性ある原子力システム」をもう少し具体性を含めて考えることにする。「自ら整合性ある原子力システム」は基本的には原子炉と燃料サイクル施設とから構成される。「自ら整合性ある原子力システム」には、天然ウランが外部から供給され、外部へはエネルギ

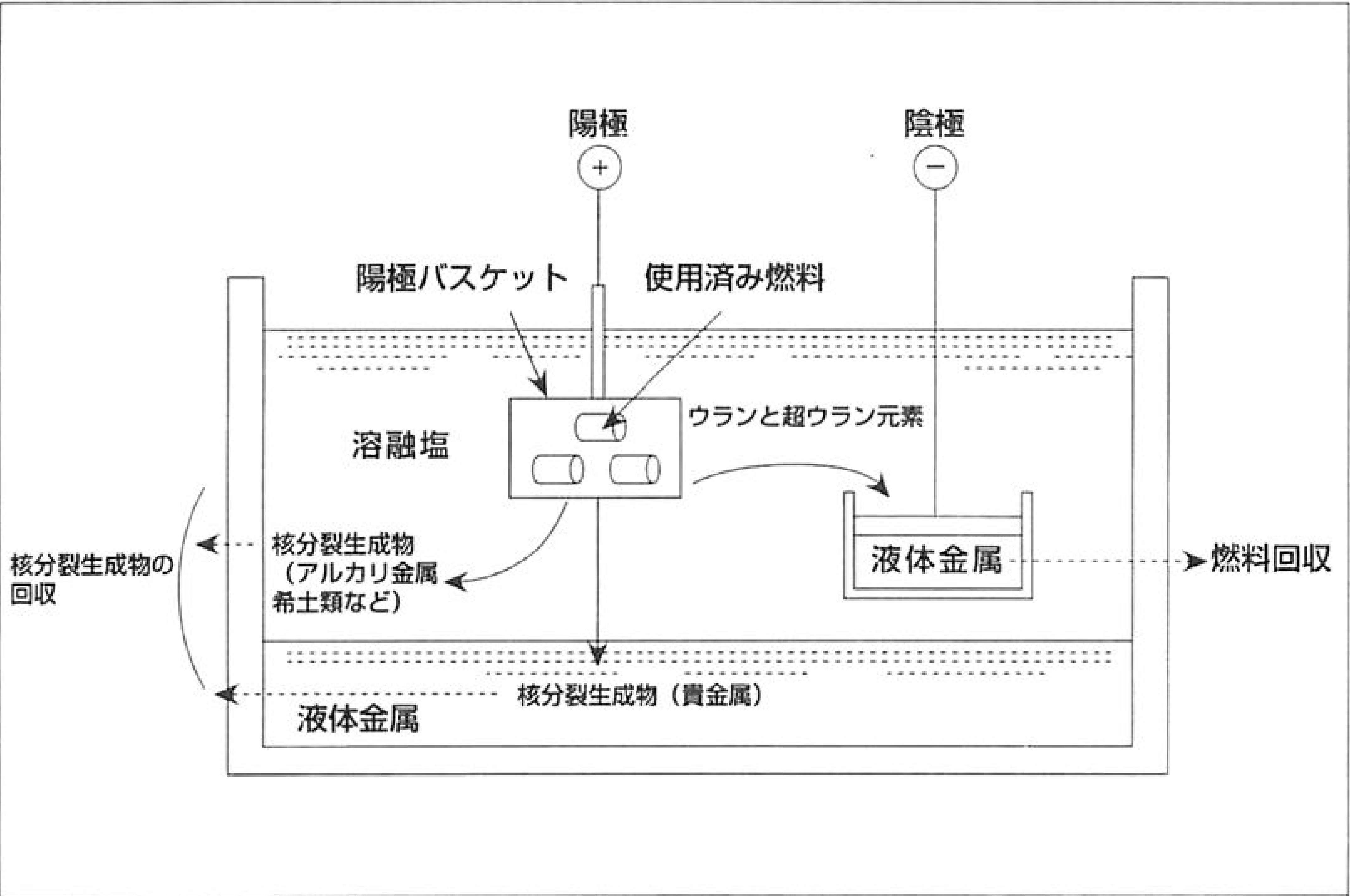


図11　化学分離（元素分離）

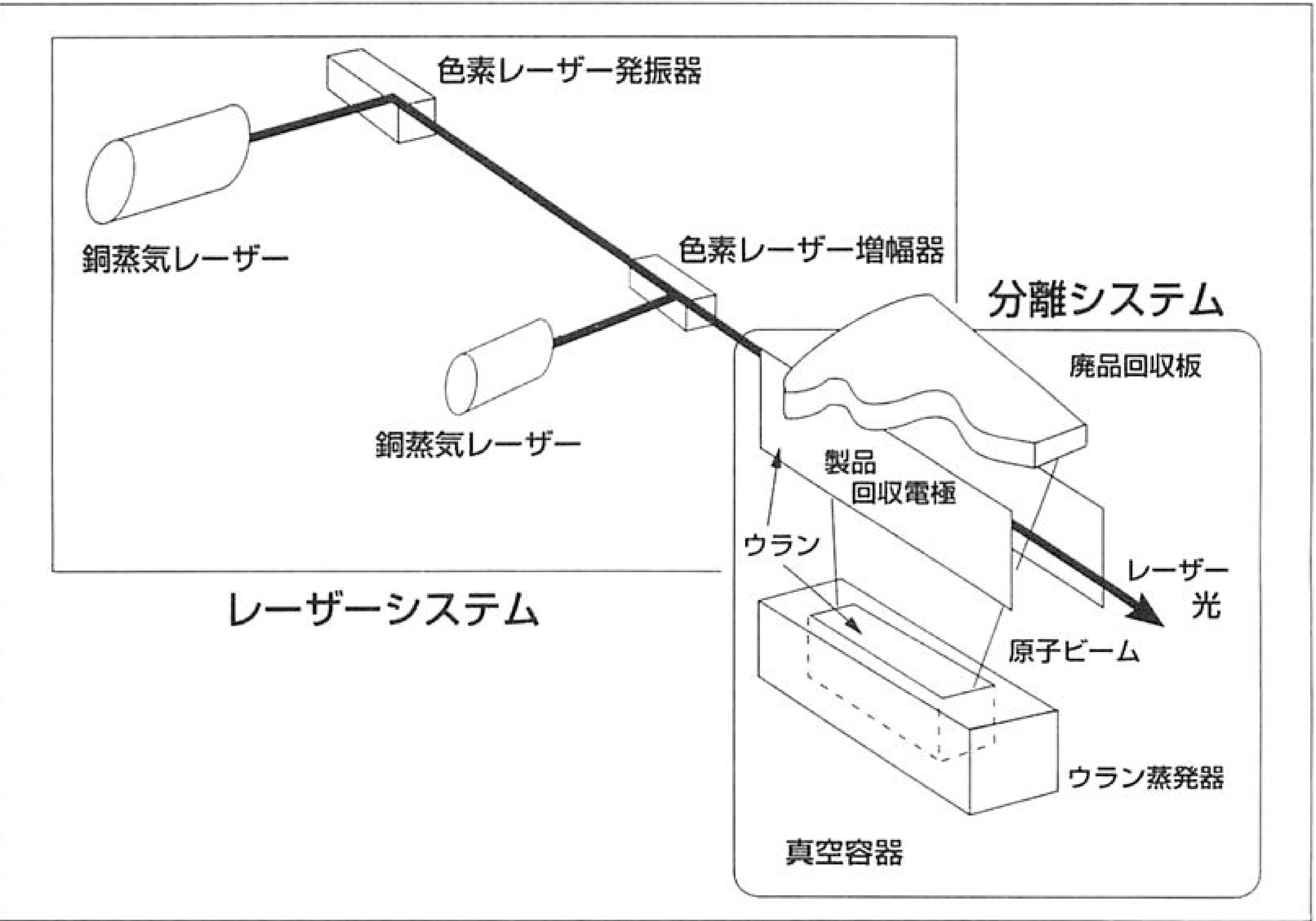


図12　レーザー分離（同位体分離）

ーが運び出されるほか、有用な放射性物質および非放射性の核分裂生成物が運び出される。

天然ウランとして金属ウランの場合と二酸化ウランの場合を考える。原子炉出力は電気出力として一〇〇万キロワットを想定し、高速中性子束ϕも現在の高速増殖炉と同程度にする（$\phi = 5 \times 10^{15} cm^2 / sec$）。このような条件下ではこの仮想的原子炉が一定の元素組成になり出力も一定に達するのに二〇年程度を要する。またその時のウランと超ウラン元素の重量は金属ウランの場合で約二三トン、放射性の核分裂生成物が約六トンとなり、これに冷却材や構造材の重量を加えると約四〇トン程度の炉心となる。このように「自ら整合性ある原子力システム」の炉心は、時間的にも空間的にも現代技術の持つ能力と研究開発のタイムスパンの中で十分その可能性と現実性が容認の範囲に入るものと言えよう。

二酸化ウランの形態の天然ウランの場合、金属ウランの場合の二三トンと比べて一七トンと更に少なくなるが、中性子バランスだけに議論を限ると金属ウランの場合の方が能力が高い。

（注II-1）

さて、ここで考えている「自ら整合性ある原子力システム」ではプルトニウムだけを選択的に分離することは考えていないし、その必要性もない。整合性成立条件を満足する程度に材料を分離したり、混合したりすればよい。従って特定の元素の性質、例えば核分裂性プルトニウムの核的性質が強調されることにはならない。うまくバランスがとれていることが重要で、言い方を変えれば、核拡散に対しても抵抗力のある平和指向型の原子力システムであると言える。

「自ら整合性ある原子力システム」の技術的開発に余裕を持たせる上で、加速器を応用することも考えられる。加速器では、原子核の破砕反応などによって反応当たり数十個の中性子を生み出すことが可能であり、中性子の供給を主眼にして中性子の数のバランス条件を緩和させることができ、原子炉の設計に余裕ができる。また、エネルギー生産にしても、原子炉を未臨界状態にして核分裂反応を連続的に起こさせ、臨界に関する安全問題を排除した運転ができる。このように、今後のエネルギー開発の中で加速器をどのように応用していくかという研究も行われている。

自ら整合性ある原子力システムの導入

付加価値の有効利用

これまでの議論で「自ら整合性ある原子力システム」が存在し得る科学的検証を中性子の数のバランスとエネルギー収支の二つの観点から行った。さて整合性の四要件を満たす最低条件が達成された場合、残された余裕を何に使うか考えてみたい。これには多くの要素がある。例えばエネルギー効率を改善する、高性能システムを開発する、放射性物質の消滅能力を向上さ

せる、燃料生産率を向上させる、安全がより分かり易い原子力システムを開発する等である。これらは、整合性達成の最低条件を満足した上でのオプションとして考えられ、社会がそのうち何を要求するかの状況認識の中で選択を行えばよい。

社会のエネルギー需要の伸びが大きく、これを原子力が基軸となってカバーしなければならない状況では、増殖に主眼を置いた燃料生産が付加価値発揮の中心となる。付加価値を資源の有効利用に向けようとの観点に立つものである。

一方、放射性物質の量の減少によって高レベル放射性廃棄物の処理・処分に対する負担を減らしたり、施設内のプルトニウムやその他のアクチニドの貯蔵量を減少させる要求が大きい場合は、超ウラン元素の燃焼を中心に考えることも重要である。

更に、エネルギー効率の改善や高性能化のための原子炉の設計の自由度を大きくし、そのシステムでは解決できない燃料サイクル上の問題を「自ら整合性ある原子力システム」との併用によって解決し、更に進んで全体として整合性を図るためにこの自由度を使う等多くの展開が考えられる。しかし、原子力発電が実用化している現在、「自ら整合性ある原子力システム」に対する最小限の要求は、中性子の数のバランスを中心としてその付加価値を高めるのに向けることが適当と思われる。この付加価値は当面、燃料の増殖と放射性物質の核変換による放射能消滅とであろう。

三つのフェーズの想定

一般にエネルギーシステムの社会への導入と定着は導入の初期に増加傾向を示し、次第に鈍化して平衡状態に移っていく。更に他のエネルギーシステムが開発されてその使命を終える段階では次第に減少していき、最終的にはゼロに近づく。従来の形での石炭利用はこのパターンであったし、石油についても増加傾向が鈍化し、これに代わって天然ガスが導入され増大傾向にある。例えば日本では発電の石油依存度は五割をはるかに割って原子力発電以下になっている。

原子力については天然ガスの積極的導入以前からエネルギーシステムの中で一定の役割を果たすようになっているが、今後世界のエネルギー需要の増加が予想され、開発途上国が原子力発電を積極的に導入しようとしているので、鈍化の段階に入ったとは考えられず、引き続いて原子力発電は電力供給の主軸としての役割を果たすものと思われる。

「自ら整合性ある原子力システム」の導入に当たっても、他のエネルギー源との関係や世界のエネルギー需給によって影響されようが、ここでは議論を単純にする。すなわち現在のトリレンマが人口の爆発的増大に原因の一つがあり、二一世紀にもこの傾向が鈍化し、安定してくるとは必ずしも言えないが、将来を考えれば地球上に人類が平和に生きていくためにはいずれ人類社会が成長社会から次第に非成長社会に移行する以外に解決の道はない。このような長期展望に立って、図13に示すようなエネルギー供給、燃料生産および放射能消滅のシナリオを

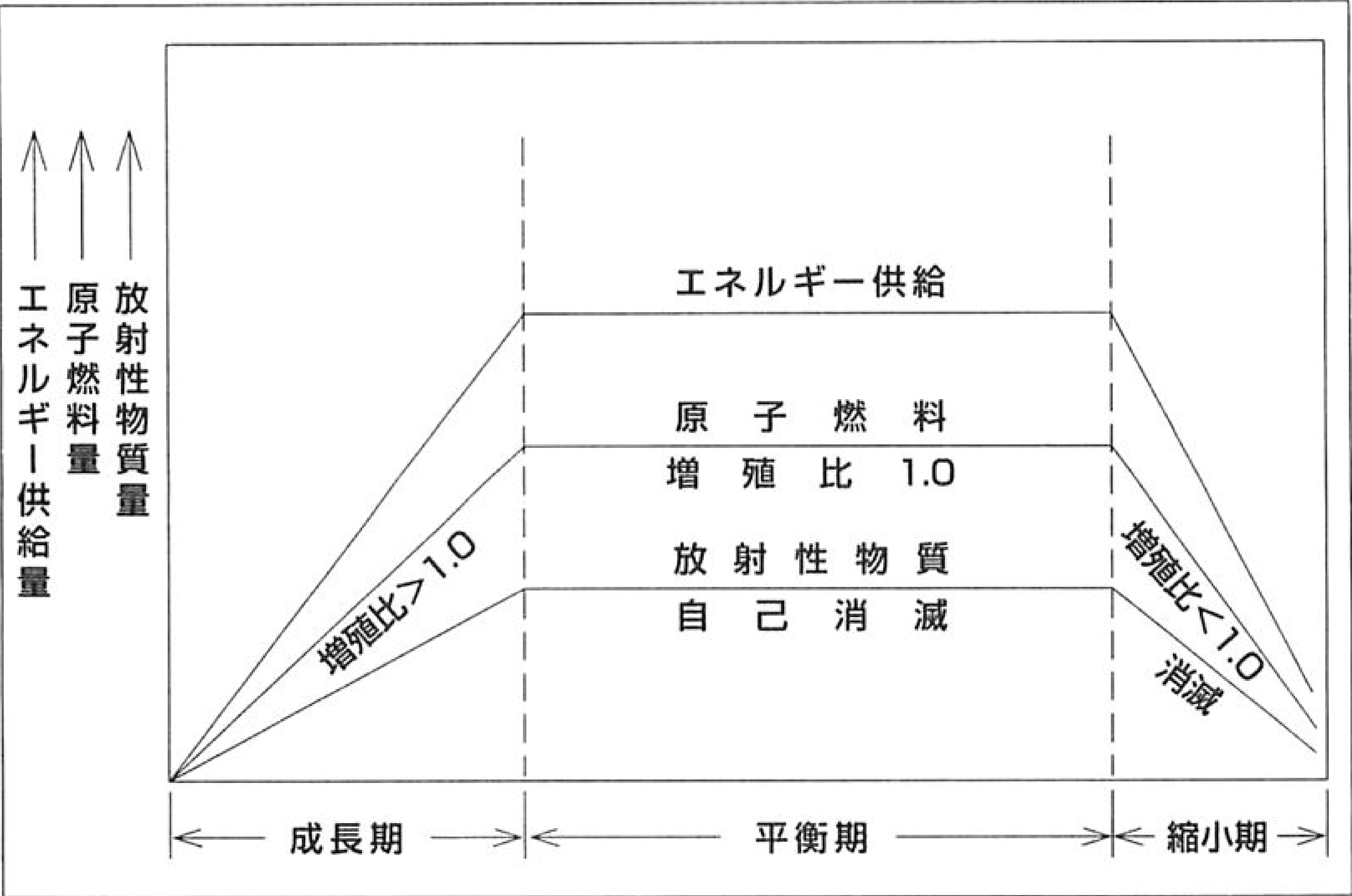


図13　整合性ある原子力システムの導入と定着

「自ら整合性ある原子力システム」に課した。第一フェーズでは化石エネルギーや他の原子力システムと次第に置換し、あるいは需要の拡大に追随してその量を拡大し、エネルギー供給の主軸となっていく過程であり、この段階では付加価値の発揮は燃料生産すなわち増殖になる。しかし、現在の高速増殖炉と異なるところは当然のことながら放射性物質の消滅に関する整合性の要件は満足されていることである。

このフェーズでは放射性物質の消滅は最低でも出力に比例して行われるので全体の出力規模の増大に比例して増大するものと考えてよい。この段階がどれくらい続くかは明らかでない。人類社会始まって以来エネルギー需要の増大は続いているのであり、非成長社会があるかどうかは誰にも分からない。しかし、とめどないエネルギー需要の増大は人類社会の滅亡につながるとの考えから、ある段階で成長は止まり、人類の英知によって非成長社会が実現すると楽観的な想定を行った。

「自ら整合性ある原子力システム」によるエネルギー供給が平衡に達するであろう第二フェーズの平衡期には燃料の増殖に対する期待は少なく、一定レベルのエネルギー供給を可能にする程度でよく、むしろ放射性物質の蓄積量を一定に保つ、あるいは付加価値を利用して蓄積量を減少させるため放射性物質の原子炉内での積極的燃焼が期待される。平衡期の存在およびそれが時間的にどれ位続くかも現在予想の外にあると考えられる。

また、整合性と言うからには核分裂エネルギー利用の最終段階での整合性を要求される場合

の解答としては、第三フェーズのように利用の減衰を想定し、「自ら整合性ある原子力システム」での物質バランスは燃料について増殖から消費に大きく移り、これまでの平衡状態での放射性物質の量を減少させることが主目的になり、核分裂エネルギー利用の最終段階においては地球上に放射性物質を残さない。環境に負の遺産を残さないでその役割を終結することになる。この時が核融合炉への移行か、あるいは人類社会の終末であるか分からない。

調和を優先したシステム

さて、この半世紀原子力開発を行ってきて、現段階での原子力をどう見るか、これは一つの原子力哲学としても重要である。原子力関係者に、ありうべき好ましい原子力システム、あるいは理想の原子炉としてどんなものが完成できるのであろうか。「自ら整合性ある原子力システム」はこの問に対する最低限の解答である。理想の形へ向けて付加価値をどう配分するかは未だ議論の余地があろう。

一方、科学技術の観点から、あるいは原子炉概念の明確化の観点からみれば、原子力開発は目的指向型の研究開発であり、概念の明確化は最終的に原子炉設計において目的達成に必要な材料選択とその空間配置の問題に帰着できることはすでに述べた。この半世紀に及ぶ原子炉概念の研究と設計研究は、果たして材料選択と空間配置の観点から見てその可能性をどこまで追求してきたか、追求すべき可能性は未だ十分残されていて更なる概念的観点からの議論を具体

的に設計に反映できるのか、あるいはもうすでにその余地はあまりなくて、これまでに提案された原子炉の型を中心により良いものを探っていくことしか残されていないのか。

ここで大事なことは従来の研究開発が原子力システムの目的あるいは要求をどこまで整理統合してきたかである。「自ら整合性ある原子力システム」は、原子力システムに対する要求を整合性の観点に立って整理統合したものであり、これまでの原子力システムの目的をより包括的に捉えているため、その条件下での概念検討はシステム展開としては新しい方向である。しかし、個々の材料選択や空間配置上のアイデアあるいは手法等はこれまでのものも十分応用できることは言うまでもない。むしろこれまでの原子力システムの研究開発の展開の成果をトップダウン的なシステム展開の中に積極的に取り入れようとするものである。この意味で従来のものを「長所追求型」と呼び、「自ら整合性ある原子力システム」の展開を「調和優先型」と呼んだ。調和がどうしたら図れるかがシステム構成の必要条件となる。

図14は「自ら整合性ある原子力システム」の原子炉の試みで材料選択とその空間配置を示したものである。

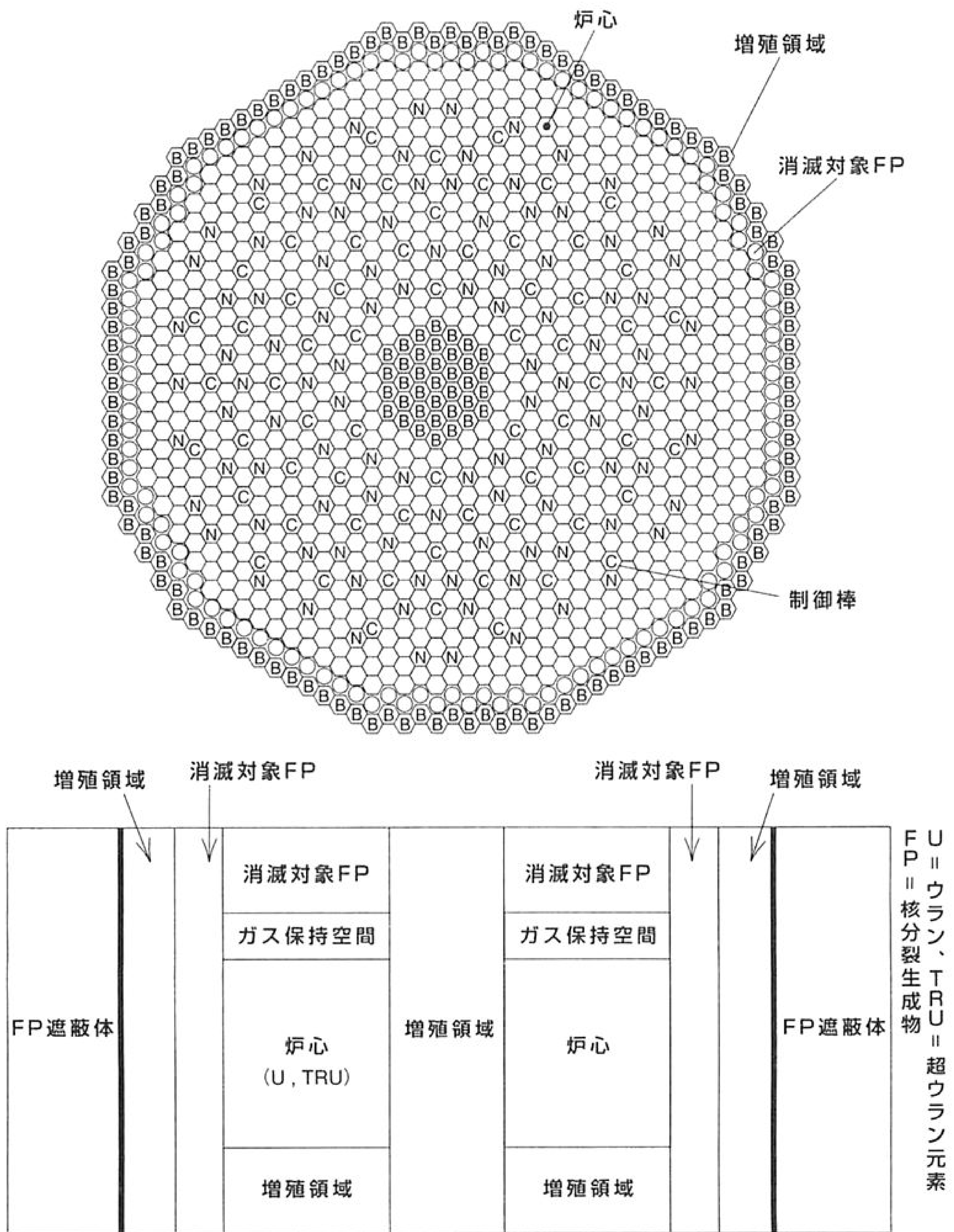


図14　自ら整合性ある原子力システムの原子炉概念図

整合性達成度の評価

社会的受容性へ向けて

これまでの「自ら整合性ある原子力システム」に関する話は、現状認識を中心に改良主義の立場から取り組んできた原子力関係者にとっては何とも夢物語のような印象で受け止められる性質のものかもしれないし、社会の人々にとっては、たとえこれまで原子力に深い関心を寄せてきた人々にしても、これまでほとんどその種の情報に接してこなかったものであろう。しかし、これが正に原子力エネルギー開発の長期展望そのものであり、また、このような考え方を原子力開発全体に敷衍（ふえん）して原子力を調和のとれた総合科学技術として人類文明の中に位置付けていくことが必要である。

これまで原子力システムの評価をする際の要件として経済性、技術性、安全性の三つをあげてきた。この三要件が満足されれば社会は原子力を容認する、すなわち社会受容性が得られると考えられたわけである。原子力発電を例にとれば経済性とは他のエネルギー源による発電原価と比べて劣らないこと、技術性とは少し内容が漠然としているが、例えば信頼性と置き換えてみれば稼働率のようなもので評価できる。安全性は原子力を社会に導入し、定着させるための前提であり、必須の条件であってこれまでの科学技術の中で初めて安全をその社会への導入

以前から評価項目として取り上げてきた。

軽水炉による原子力発電を例にとってみると、発電原価も稼働率も安全性もそれぞれに十分な実績があり、社会に自信を持って語りかけられる状況になっている。しかし、現在必ずしも十分な社会受容性が得られているわけではない。もちろんその原因は複雑で、簡単な分析で結論を得られるわけではないが、文明が転換期を迎えているとの認識に立てばこれらの評価項目の中には、安全性のように環境や社会との調和へ向けた要素を持ったものもあるが、経済性にしろ技術性にしろ有効利用的性質のものであり、全体として「利用」の性格が強く「調和」の理念を前面に出しての評価になっていないところに課題が残されているのではないかと思われる。しかし、経済性や技術性を無視しては技術は成り立たないことも十分理解されるべきである。

これまで「自ら整合性ある原子力システム」について科学的可能性を検討し、必要条件を満足するのはもちろん、多少の余裕のあることも分かったが、科学的可能性があるからといって、これが技術的にも一気に達成されることには必ずしもならない。技術開発は整合性達成へ向けての長期展望に立って究極の目標に至る道筋の上に常に近未来の目標を明確に定めて一歩一歩着実に近づいていくのが正道であろう。

客観的指標

ここで重要なのは客観的評価指標を定義し、個々の原子力システムの整合性達成度を評価で

きるようにしておくことである。もしこの評価指標があれば「自ら整合性ある原子力システム」を究極的システムの原点とし、将来の原子力システムはもちろん、現在のものも含めて個別に比較評価できる。また、何が近未来の研究開発の重点目標になるかの選定の指標ともなる。このような比較は科学技術的観点だけでなく社会受容性の観点からも重要であろう。

客観的に達成度を評価するための指標には「調和」を「利用」より高位の概念としておく必要があろう。しかし、科学技術は何らかのメリットを人類社会にもたらすことを目的としているものであるから、「調和」の概念は当然「利用」の概念を内包するものでなければならない。ただ、利用を考えるにしても原子力の本質である原子核反応に伴うエネルギーおよび物質の通常の流れについての評価が明確になっていることが前提になる。

原子力システムは自然界の放射能を減少させることができるのか、あるいは増大させるのかといった環境保全にのみ焦点をあわせた評価をするには当該システムに持ち込まれる放射能、これは天然ウランの放射能であり、ウラン238とウラン235の放射能の和になるが、これと原子力システムの運転の結果蓄積される放射能との関係で決まる（図15）。原子力システム内で処理または貯蔵できなくてシステム外に放出される放射性物質の量は結果的にシステム内で運転に伴って生み出される放射能と消滅される放射能の差となる。この比が１であれば放射能は変化しない。

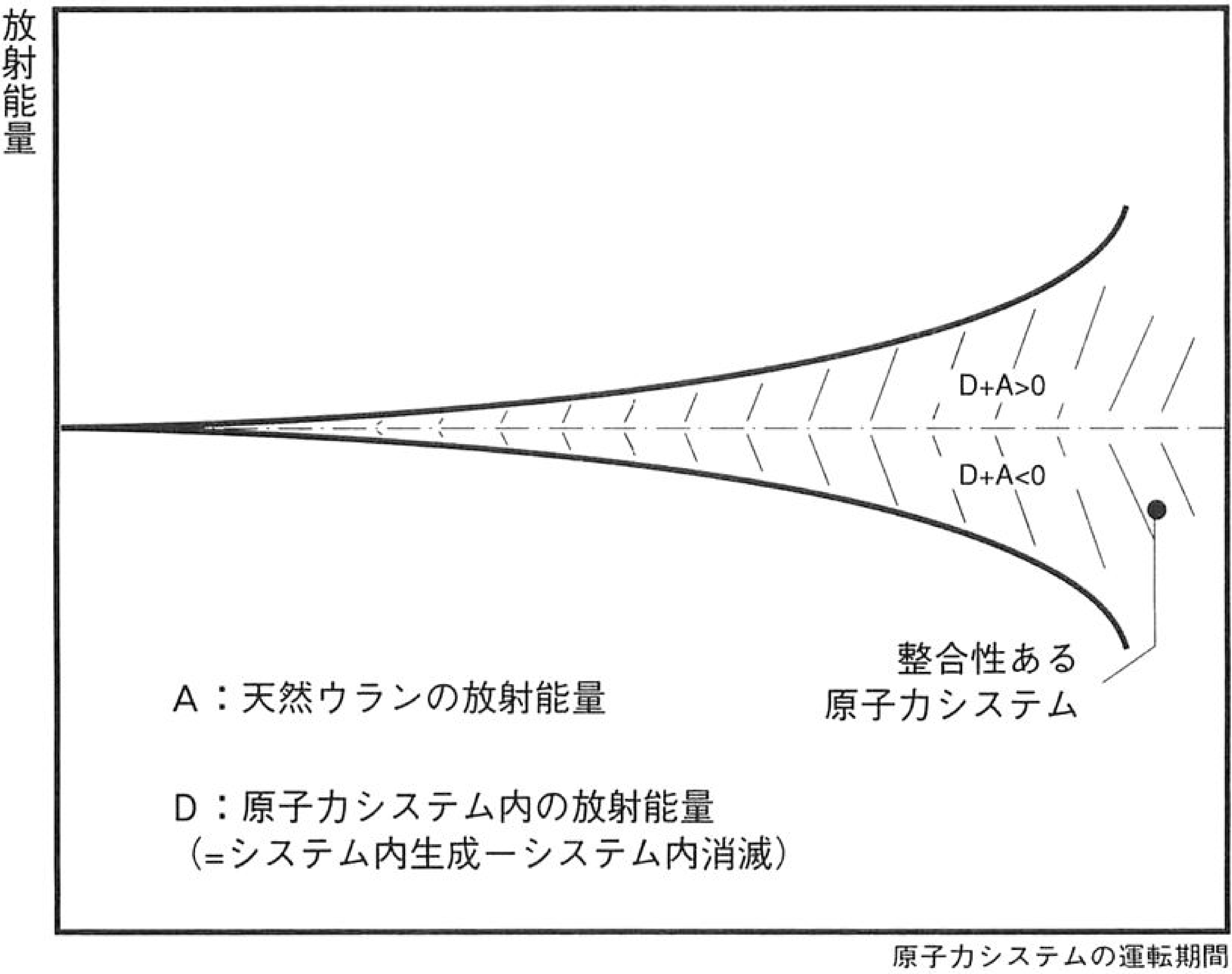


図15　原子力システムと放射能

この際、天然ウランが原子力システムに持ち込んだ放射能相当分は有用な放射性物質、例えば医療用、工業用アイソトープとして人類社会に持ち込まれることになれば管理の対象とできるので問題はないと言える。現存する原子力システムはそのほとんどが放射能を増大させるシステムとなっている。従って新たに生み出された放射性物質を深地層処分すること等を考えている。

さて、放射性物質の存在が潜在的に危険であるとするなら、放射性元素を単に存在量だけで表現するのではなく、何らかの危険の度合いを示す係数をかけたものがあった方がよい。いくつかの表現の仕方があるかと思えるが、係数としては年間摂取限度の逆数と半減期の積を採用することが合理的だと思われる。前者は危険度を後者は危険がどれだけ続くかを示す量だからである。これが放射性物質の潜在的危険度としての表現となる。

半減期が長いほど負担は飛躍的に増大すると考えるなら半減期の二乗をとることも考えられる。図16は超ウラン元素と核分裂生成物について潜在的危険度を示したものである。超ウラン元素は燃料として利用するのが原則であるが、超ウラン元素のうち環境インパクトが大きいものは何か。また、長半減期の核分裂生成物のうちどの同位元素のインパクトが大きいかをみておく必要がある。これはゼロ・リリースの原則を技術的に達成する道筋の上で潜在的ポテンシャルの減少、更には消滅の方向を示すことである。技術開発の立場からどの放射性元素に着目

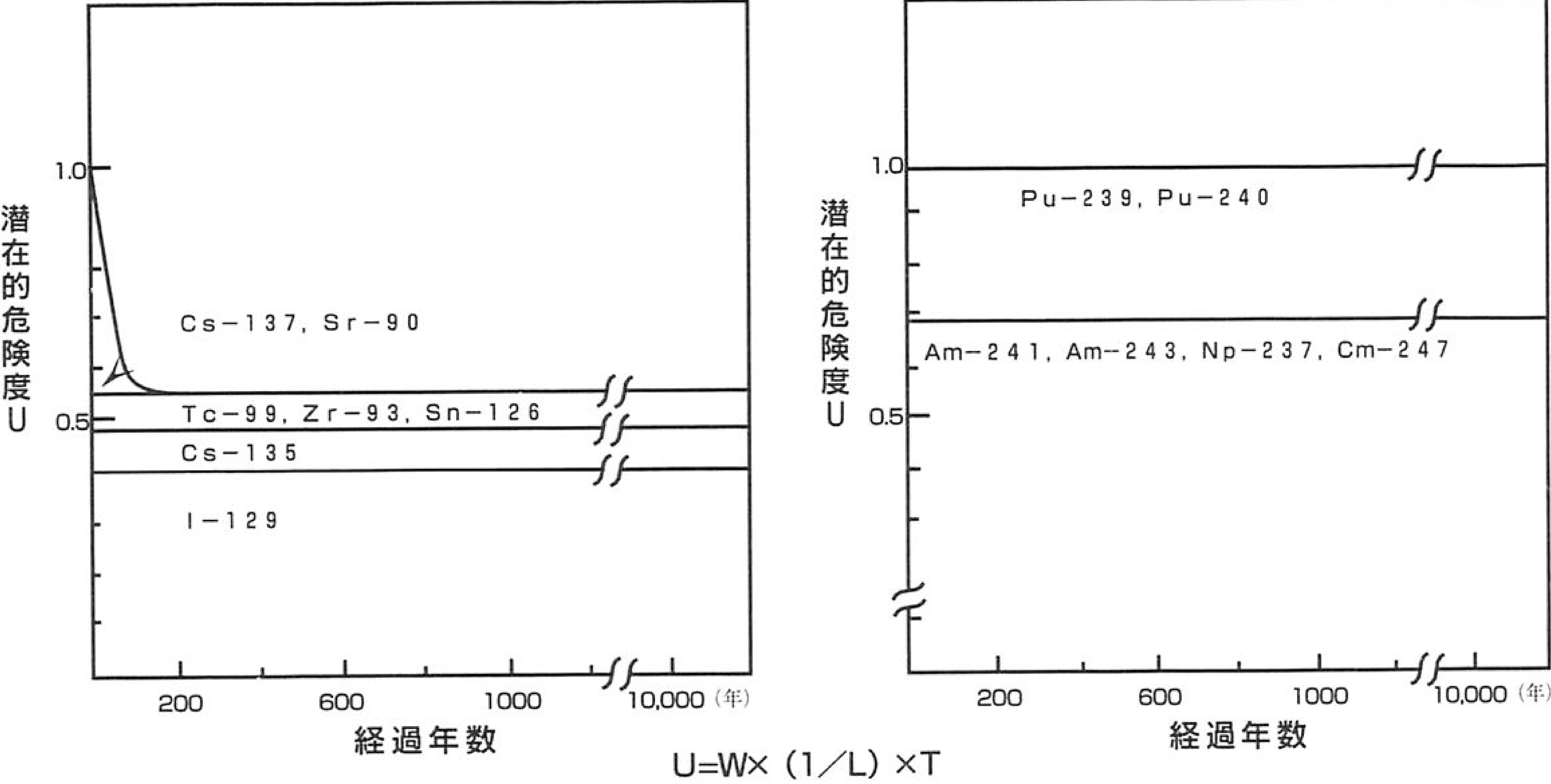


図16　超ウラン元素及び核分裂生成物の潜在的危険度U

して放射能消滅を考えていけばよいかを考える上でその元素の物理的、化学的特性は元素分離の難易さをみる上で重要であるが、これは技術の具体化の上での評価であるとして、放射性物質としての特性で言えば潜在的危険度の大小に直接関連することになる。潜在的危険度の大きいものほど消滅する価値が高いと言える。

さて、エネルギー生産については核分裂の連鎖反応が起これば最低限満足されることであるが、発電システムを考えると核分裂エネルギーの利用効率を考慮しておくのがよい。エネルギーの有効利用の観点に立てばこれに加えて燃料サイクルで消費されるエネルギーを差し引いて有効エネルギーを考えるのが科学的可能性を検討した場合と同一の論理構成になるので好ましい。

原子力発電の社会への貢献がエネルギー供給だとすると、評価関数は燃料生産の観点を加えてむしろ原子力システムの運転を通して天然ウランから取り出せる有効エネルギーの量を考えるのがよい。原子力システムの中で天然ウランのどれだけが燃料に転換できるかを端的に表現できるのは燃料への転換比あるいは増殖比である。これが一より小さい場合は原理的に一部しか、大きい場合には全部が燃料元素となる。

さて、ここで評価指数として原子力システムで得られるエネルギー量でシステム内で処理で

きない放射性物質の量を割ったものを定義するのが一つの方法である。すなわち分母にエネルギー量を、分子を第三フェーズでの残存放射性物質量あるいは潜在的危険度にしたものが望ましい（図17）。負担という意味ではマイナスを付けておく方が望ましい。すなわちその値がマイナスの場合には社会や環境に与える一種の潜在的負担と考えられるから、これを不安指数と名付けることもできる。軽水炉は第一と第四の要件は現在ほぼ満足していると考えられるが、燃料の生産も放射性物質の消滅もわずかで、十分な能力は発揮していない。

整合性評価指数

転換比が一より大きくて達成度の評価指数がゼロであることが「自ら整合性ある原子力システム」の達成条件である。将来的には科学的可能性の検討で評価された付加価値を更に利用してこの評価指数をプラスにすることが期待される。

もちろん、この評価指数は調和の理念を大前提にしたものである。一方、放射性物質の放出防止を技術的に達成する立場からは、潜在的負担を事実上顕在化させない方法もある。すなわち、原子炉の中で消滅処理できなかった放射性物質をその移動性を極端に減少させ、地中深く処分する技術を確立し環境から隔離して消滅に相当する効果を得ることが考えられている。これが技術的に可能になれば、この不安指数は顕在化することのない心理的負担あるいは厄介さ

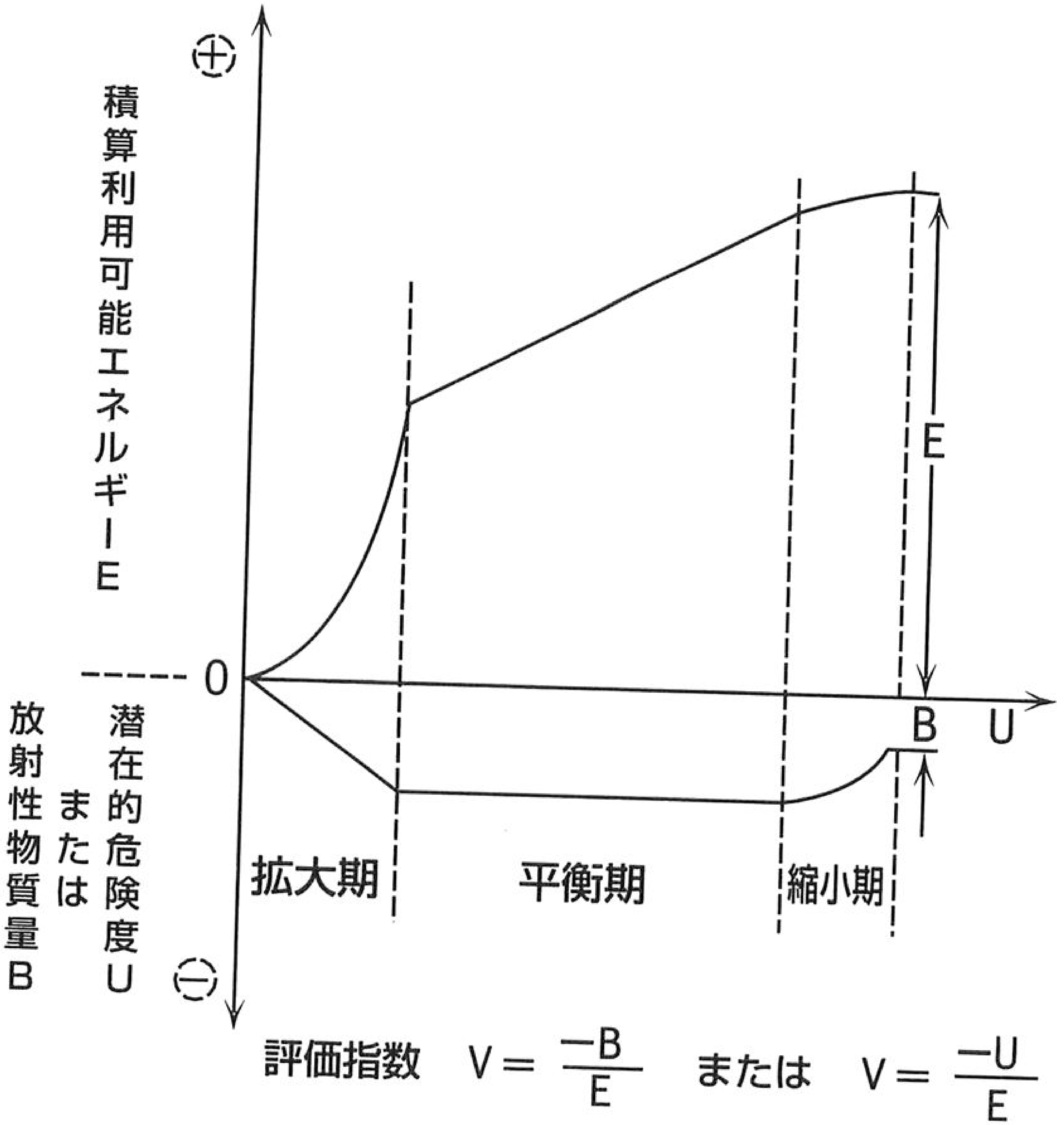


図17　評価指数の概念図

項　目	軽水炉	ＦＢＲ	アクチニドリサイクルＦＢＲ＊1	自ら整合性ある原子力システム（１）＊1	自ら整合性ある原子力システム（２）＊2
発生電力(エネルギー)量、Ｅ	1	220	230	230	230
残存放射性物質量Ｂ	1	70	50	45	0
残存放射性物質の潜在的危険度、Ｕ	1	300	9	2.2	0
整合性評価指数、Ｖ＝－Ｕ／Ｅ	－1	-1.3	-0.04	-0.01	0

＊1リサイクルロス率0.1%　＊2リサイクルロス率0％

現存または開発中のシステム

・天然ウラン→軽水炉(ワンスルー) システム　→エネルギー
超ウラン元素(プルトニウム、マイナーアクチノイド)
核分裂生成物*

・天然ウラン→ＦＢＲ(Puリサイクル) システム　→エネルギー
マイナーアクチノイド
核分裂生成物*

・天然ウラン→ＦＢＲ(超ウラン元素リサイクル) システム→エネルギー
核分裂生成物*

*放射性および
安定核分裂生成物

表３　整合性評価指数による種々の原子炉概念の比較

と言えるのかもしれない。

さて、この評価指数について考えてみるとこれはマイナスからプラスにわたって値が存在することになる。マイナスは「自ら整合性のある原子力システム」としては未だ不十分であることを意味し、ゼロは最低条件は満足していることになる。更にプラスになると、付加価値を発揮するところまで能力が発揮できるような熟成したシステムであることを示している。核エネルギーがどれだけ有効に利用されるかはプルトニウムの核燃料としての使用にかかっている。科学的には転換比が一以上になれば原理的に天然ウランを一〇〇％利用できることにもなるが、燃料サイクルでのロス等の技術的側面をみておく必要がある。この場合ロスをパラメーターにすれば負担の程度もみえることになる。近未来の目標を定めることにもつながる。表３は整合性の立場から種々の原子炉概念を比較したものである。

4 原子力文明とゼロ・リリース

ゼロ・リリース(無放出)の原則

ゼロ・リリースの二つの側面

原子力システムの究極の目標は、原子力システム外に無用な放射性物質を出さないこと、すなわちゼロ・リリース（無放出）の達成である。「自ら整合性ある原子力システム」は、もちろんこの究極の目標を達成することにあり、科学的可能性の検証が行われた。「自ら整合性ある原子力システム」に求められる整合性のうち第三の要件がゼロ・リリースに直接関連する。すなわち、原子力システムの中で放射性物質を消滅することである。

原子力システムにゼロ・リリースの原則を導入することが可能と思われるのは第一にエネルギー生産に寄与する物質の量が化石燃料に比べて圧倒的に少ないことである。排出側で比較すれば一グラムのウランが燃焼してエネルギーを生み出す際に生じる核分裂生成物が約一グラムで、そのうち放射性物質は約三分の一グラムなのに対して、同量のエネルギーを生み出すのに例えば石炭は二・五トン必要で発生する炭酸ガス量は約一〇トンとなる。更に気体状の炭酸ガ

スを閉じ込めることが難しいのに対し、放射性物質は、閉じ込めが決して困難でないことはこれまでの実績の示すところである。更に決定的なことは炭酸ガスはシステム内で再び炭素と酸素に分解することがエネルギー的に無意味なのに対して放射性物質の非放射化は核分裂中性子の数のバランスの範囲で可能であり、エネルギー的にももちろん可能性がある。従って技術開発を行う十分な意味を持っている。

ここで強調すべきことは炭酸ガスのようなエネルギー生成に際して生じる反応生成物を一〇〇%放出することが原則の石油文明とは明らかに違って、原子力文明は反応生成物を放出しないことが原則、すなわちゼロ・リリースの原則を導入した新しい調和ある文明を究極的に構築しようとしていることである。

放射能消滅能力

原子力システムは原子核と中性子の反応によってエネルギーを取り出し、利用しようとするものであるから、反応の結果生まれる新しい元素の多くが放射性元素である。このため、放射性物質を常にシステム内部に蓄積している。核分裂にしろ核融合にしろ放射能フリーなシステムにはならず、また、ウランやトリチウムといった原子力システムの燃料自体が放射能を持っている。

「自ら整合性ある原子力システム」では、最小限自らつくり出す放射性物質を自ら消滅させる

能力を持っていることが条件である。言い方を変えれば、自分でつくった放射性物質を直接すべて瞬間的に非放射性物質へ転換することは原理的に不可能であっても、少なくとも別の原子力システムでつくり出された放射性物質を含めて自らつくり出す放射性物質と同等あるいはそれ以上の放射性物質を消滅する能力を持っていることが条件である。このため、人類社会に有用な放射性物質を除いて放射性廃棄物がシステム外に出されることは原則的にはない。これが放射性物質の消滅という整合性の第三の要件の意味するところである。すなわち、通常のエネルギーや物質の流れにおいて放射性物質はすべてシステム内に閉じ込められており、システム内で有限の時間で放射性物質の消滅が可能になる。これがゼロ・リリース（無放出）の原則の強調すべき基本的事項である。

臨界問題からの解放

「自ら整合性ある原子力システム」の安全問題すなわち整合性の第四の要件は、システム内部に蓄えられた放射性物質が事故によって外部に漏れ出ることを防ぐことである。これがゼロ・リリースの原則を満たすための、もう一つの側面である。放射性物質は「自ら整合性ある原子力システム」のいろいろな場所に存在することになる。システム内部に蓄えられた放射性物質はシステムの内外におけるエネルギーの異常解放がその起因となって環境への漏洩の可能性が出てくる。エネルギーの異常解放を防止、抑制することが安全確保の出発点である。

原子炉の安全確保の基本が原子炉を必要に応じて「止める」そして「冷やす」ことであるというのは核分裂の連鎖反応の特徴に由来するエネルギーの異常解放を防止する観点からの言い方である。一方、外部要因としては航空機落下や工場の爆発等の社会的要因や、地震、津波、台風、雪等の自然現象がある。

軽水炉と同等あるいはそれ以上の安全を目指すことが新型炉開発の当面共通した目標である。核分裂炉の特徴から見れば安全の問題は核分裂の連鎖反応に直接関連したものと、発生した熱の冷却に関連したものとになるが、軽水炉はこれまでの実績が示す通り、安全性に優れた特徴を持ち合わせている。軽水炉については炉の特徴から核分裂の連鎖反応の能力が小さいため、連鎖反応に直接関連した安全問題は事実上なく、冷却に関する課題が安全確保の中心になっている。

核分裂の連鎖反応に直接関連した安全は、要するに必要に応じて原子炉を「止める」ないしは「止まる」ことを意味している。もう一方の原子炉を「冷やす」ないしは「冷える」については軽水炉のこれまでの実績に加えて、スリーマイル事故以降多くの概念が提唱された受動的安全炉が参考になろう。

核分裂の連鎖反応に直接関連した安全問題、すなわち臨界安全からの基本的解放を「自ら整合性ある原子力システム」の満たすべき安全に関する基本的条件と考えている。「自ら整合性ある原子力システム」は軽水炉に比べて付加価値が高いので、一般的に言えばより制約が加わ

る。このため、軽水炉と同等あるいはそれ以上の安全確保を目指すためには工夫が必要である。今後の原子炉の安全は平易な安全論理によって構築されることが望ましいし、また社会的にも技術的にも安全は常に原子力システム全体の要であることが求められよう。このことは過度に保守的な考え方に立って安全を確保することを意味するものではなく、原子炉の中で生じ得る物理現象に対する十分な知見によって合理的と判断できる安全確保の考え方を基本にすることを意味している。

核分裂の連鎖反応の臨界に関連した現象は、変化が速いので工学的手段に頼る以前に原子炉が本来的に備えている固有の安全性や自己制御性によってコントロールされ、安全が確保されることが望ましい。すなわち臨界に関連した異常事象に対して原子炉自身が固有の耐性を備えていることが要求されることになる。工学的手段はこれらの固有の安全性や耐性をベースにシステム全体を合理的にするものとしての位置付けと原子炉の運転性能を向上させるためのものとしての位置付けとがある。

原子力の安全に技術万能の考え方はそぐわない。安全の基本的な部分が固有の安全性、固有の耐性に裏付けられていることが重要である。結論的に言えば、「自ら整合性ある原子力システム」の安全確保の第一は、臨界に直接関連した安全問題を排除することである。これは原子炉の運転が正常な状態からずれた場合でも核分裂の連鎖反応が異常に増大して超臨界状態にな

り、自ら異常を拡大させることを未然に防ぐ原子力システムを構築することである。

このように臨界安全を原子力安全の第一義的なものと考えれば、これは明らかに整合性成立要件の科学的可能性の検討で行ったように原子炉の中での中性子の配分問題そのものになり、「自ら整合性ある原子力システム」の満たすべき四つの要件は安全も含めて中性子の「合目的」的配分によって総合的にその達成可能性が評価されることになる。強調すべきことは四つの要件の達成が中性子の数のバランスで統一的に確かめられることである。

再臨界現象の排除

通常時の中性子配分は、これまで見てきたように核分裂の連鎖反応の維持、すなわち臨界の維持、燃料生産、放射性物質の消滅の役割に当てるほか、構造材等による吸収や原子炉からの漏洩によって失われるものもある。この中性子配分が異常時に崩れて核分裂への寄与が増大することを防止することが安全の第一の目標で、安全が全体の要として位置付けられるところである。

異常や事故に際して臨界の維持に寄与する中性子を減らすために中性子がより高速になることを抑止したり、漏洩や寄生吸収の増大を固有の特性の範囲で可能にすることである。

次は再臨界現象の排除を目的にした炉心崩壊に関連した安全問題である。これは、原子炉が原型をとどめなくなった場合でも再臨界になることがないことを理論的に説明できる原子炉を

つくり出すことである。原子炉の事故のシナリオに無関係に炉心が正常な形をとどめず崩壊した場合をたとえ想定しても、炉心が臨界に達しないような設計上の配慮が払われることが望ましい。これは原子炉の形状が損傷した場合、例えばスリーマイル原子炉事故の場合がそうであったように炉心溶融が万一生じたとしても、原子炉が再び核分裂の連鎖反応を継続できる状態になることを固有の耐性によって防止すること、すなわち再臨界の可能性をなくすことである。

このように臨界に関連した安全問題を健全炉心と崩壊炉心とに分けて考えることは合理的である。健全炉心については安全も当然のことながら原子炉の付加価値や特性を決定する前提として考えられるべきものであり、他の整合性の三要件を発揮させる上での制約条件となる。健全炉心での臨界安全の特徴は自己制御能力として考えられ、想定される異常に対して原子炉が自ら停止に至らないまでも安全で安定した状態に収まることである。更に崩壊炉心に関しては、原子炉内の物質の移動に選択性と方向性を持たせ、物質の移動によって連鎖反応の能力が増大しないようにすることである。このことは原子炉が核分裂の連鎖反応の臨界性に対して基本的に安全であることを示す上で重要である。

このような安全上の考え方や特徴は、当然のことながら積極的に原子炉の材料選択と空間配置の決定、すなわち原子炉の設計に応用されなければならない。

燃料サイクルとゼロ・リリース

閉じたサイクルへ

燃料サイクルとは原子力システムにおける核分裂反応に関与する元素や物質の流れを総称したものである。原子力システムでは天然ウランが外部から導入され、内部で元素の分離、混合および核変換が生じて、最終的には外部に元素や物質が搬出される。

さて、「利用から調和へ」の理念の転換は燃料サイクルに対して何を求めることになるかを見ておきたい。

ゼロ・リリースの原則は、原子力システム内の元素や物質のうち放射性物質に焦点を当て、その存在および循環を原子力システムの内部に限定し、有限の時間で非放射性物質に転換することで燃料サイクル全体のシナリオが完結することを求めている。具体的にはウランおよびプルトニウムを含む超ウラン元素の核燃焼と核分裂生成物の放射能消滅とが課題となる。現在は状況論の中ではプルトニウムや高レベル放射性廃棄物を個々に取り上げた論議がなされているが、問題の本質は原子力システムの燃料サイクルにおける元素や物質の流れ全般に関連している。

さて、従来の「利用」の考え方では原子力システム内の放射性物質についてその消滅を念頭においたゼロ・リリースの条件を課すことなく、原子力開発を進めてきた。従ってゼロ・リリー

スと現実の燃料サイクルとの関係、言い換えれば「利用から調和へ」の理念転換の難しさはどこにあるのかを見ておく必要があろう。

現実を抜きにして調和への道筋を語るのは難しいが、少なくとも将来展望の中にゼロ・リリースの解があることを示しておく必要がある。原子力関係者はこれまでも原子力発電中心に整合性の個別要件のそれぞれには対応してはきているが、全体を統一的に見ていなかったり、あるいは研究開発の途中で進展にバラツキが出たりして、とてもゼロ・リリースの原則に積極的に近づく方向になっていない。むしろ現実のアンバランスの中で苦しんでいる状況があると言えるのかもしれない。

ゼロ・リリースの原則は原子炉内部で生まれる放射性物質を再び原子核反応か、あるいは自然の崩壊によって有限の時間で非放射性物質に転換することである。ところで、原子力発電によって生じる放射性物質としてはプルトニウムを含む超ウラン元素、核分裂生成物、更には構造材等の放射化物等がある。もちろん、燃料サイクルの出発点となる天然ウランも加えておく必要がある。利用の観点に立てば、このうちウランやプルトニウムは燃料としての価値を持っているが、プルトニウム以外の超ウラン元素は核分裂性物質としての価値はあっても量的にエネルギー源としての意味は少なく、利用の観点からはわざわざ回収するほど重要ではない。軽水炉の中ではこれらの超ウラン元素をマイナーアクチニドと呼んで、核分裂生成物と同様に高

レベル放射性廃棄物に含めている。核分裂生成物や放射化物は再び核分裂反応でエネルギーを生み出すことはなく、利用の観点から厄介者でしかない。従って利用の観点からは価値あるものは再利用し、価値のないものは廃棄しようとするのが当然である。

しかし、原子力の安全を重視する立場からは廃棄物であっても安全に安定に処理・処分することで社会および環境から隔離しようとしている。使えるものは使って、使えないものは安全に処分するとの考え方が使用済み燃料の再処理路線を生みだし、放射性廃棄物の深地層処分の研究開発につながっていった。

当初、世界の原子力開発先進国は原子力開発の長期展望に沿うべく、再処理路線をとってきたが、その後核拡散に対するインパクトや経済性最優先の立場からこのような燃料サイクル路線を一時的に放棄または中断する国も現れてきた。

プルトニウムとゼロ・リリース

プルトニウムの消極的利用

原子力発電を続けるとプルトニウムは必ず生産される。プルトニウムを消極的に使うか積極的に使うかで原子力開発に対する姿勢が変わってくる。この姿勢は一企業の姿勢というより一

つの国によって代表されるものである。

最も消極的なのは原子炉運転中にウラン238が中性子を吸収して生まれるプルトニウムのうち、燃料交換までに原子炉内で燃焼するものだけ利用して使用済み燃料は再処理せずに保管廃棄しようとするもので、いわゆるワンス・スルー型の利用である。これでは軽水炉の中でできたプルトニウムの約半分しか使うことにならず、使用済み燃料中にプルトニウム約〇・七%と未燃焼のウラン235約〇・九%が残る。これらの価値を再利用しないで捨てようというのである。アメリカはこの路線をとっている。カナダは天然ウラン燃焼の重水炉(CANDU、注II-2)を自主開発し、最初から使用済み燃料の再処理は考えていない。

アメリカはカーター政権以来、民間でのプルトニウムの再処理政策を放棄し、軽水炉からの使用済み燃料はそのままネバダ州の砂漠の地下深く(注II-3)に保管廃棄しようとしている。ゼロ・リリースの原則は当然満足されない。

アメリカにしろ、カナダにしろ資源が豊富で広大な国土を持つ国でこのような政策がとられることは理解できても、日本のような資源に乏しく国土の狭い国々は真似できるものではない。また、イギリス、フランス、ドイツもこのような立場はとっていない。

カーター政権下のアメリカで、原子力発電から生み出されるプルトニウムの核拡散性と経済性の問題が提起された。世界は国際核燃料サイクル評価会議(INFCE、注II-4)を開いてこの問題を検討し、プルトニウムと原子力の平和利用が両立できることを結論するとともに、

プルトニウムを純粋な金属元素として利用せず、混合酸化物燃料（ＭＯＸ）として使用することを提言した。しかし、カーター政権は米国内の民間再処理政策を経済性の観点もあって放棄した。更に外国の燃料サイクル政策に対しても核不拡散の観点からの厳しい発言や干渉を行ってきた。この政策は同じ民主党のクリントン政権でも継承され、原子力の利用に厳しい姿勢を見せている。

アメリカでは一〇〇基以上の原子力発電所が稼働中なので、プルトニウム量の着実な増加で将来深刻な事態を迎えることが予想される。使用済み燃料のままでの保管には限界があると考えるべきであろう。過去にはアメリカのエネルギー省は、問題の深刻さを考え、これまで超ウラン元素の燃焼あるいは専焼を当面の目的とした高速炉である液体金属炉（注Ⅱ-5）開発を支持してきた。その代表的なものはフェルミが世界で初めて原子炉を製造し、これまで世界の原子力開発の指導的立場にあったシカゴ大学のアルゴンヌ国立研究所が中心となって推進してきた一体型高速炉（ＩＦＲ）計画（注Ⅱ-6）である。

ＩＦＲ計画の当時の目標は、現在のアメリカ政府の原子力政策の枠の中にあっては高速増殖炉によるプルトニウムの積極的活用は将来の課題として残し、高速増殖炉と共通の技術基盤を持つ液体金属冷却炉で高速中性子による核分裂を利用し、プルトニウムのほかアクチニドを燃焼させ、放射性物質の消滅に貢献することであった。もちろんこのようなプルトニウムやアクチニドは現在アメリカで稼働中の軽水炉の運転によって使用済み燃料の中に蓄積されるものを

当面の対象とした。

ＩＦＲ計画は燃料サイクルを包含したもので一体型高速炉システムによって現在のピューレックス法（注Ⅱ-7）のようにプルトニウムだけを特別扱いせず、超ウラン元素の燃焼を同時に考えているが、当然プルトニウム増殖も可能な概念である。新型液体金属炉（ＡＬＭＲ）の例としてはゼネラル・エレクトリック（ＧＥ）社が開発中のＰＲＩＳＭがある。しかし、クリントン政権は原子力、特にプルトニウムに対しては厳しい態度を示しており、原子力関係者のロビー活動を中心にした反論にも拘わらず、ＩＦＲ計画は中止のやむなきに至った。

整合性ある原子力開発の中でプルトニウム技術は不可欠と考えながらも短期的にはアクチニド消滅の観点を強調し、高レベル廃棄物の大幅な低減を図っていく中で、技術を確立していこうというアメリカの原子力学会を中心に原子力関係者の努力が環境保全の観点から近い将来どのように再評価され研究開発が復活するかに深い関心がある。そのためにはアメリカで、エネルギーの、そして原子力の長期展望を明示する機運の盛上がりが必要である。現在のアメリカには長期展望がなく、経済性と核不拡散のみがひとり歩きしているように思える。

プルトニウム・リサイクル

さて、プルトニウム利用に関して少々積極的なのは、軽水炉で生まれるプルトニウムを再処理して再び軽水炉や重水炉等に燃料として使用しようとする立場である。これがプルサーマル

（注Ⅱ-8）と呼ばれるものである。高速増殖炉開発が停滞している現状では、原子力の開発の柔軟性の中での現実的な解決策であり、プルトニウム、ウラン235とも再処理して利用するので利用度はあがる。これはイギリス、フランスやドイツあるいは日本が資源の有効利用と環境負荷の軽減の観点から採用してきた方法であった。特にドイツは原子力発電の燃料は再処理することを法律によって決めていたが、最近再処理施設開発の遅れや世界的な議論の中で必ずしも再処理を前提としない方向に法改正をしたと言われる。このように日本をはじめフランス、イギリス、ドイツは再処理を前提に考えてきた。アメリカも原子力開発当初は、当然のこととして高速増殖炉開発でも世界の先頭に立ち再処理を前提とした原子力開発を考えてきた。

世界ではすでにドイツやフランスのようにＭＯＸ燃料をほぼ商業的規模で製造し、軽水炉で再利用している。日本も原子力委員会においてプルトニウムの利用については議論が進み、軽水炉でのＭＯＸ利用を位置付けている。フランス、イギリスでは実際に再処理工場を建設し、運転してきた。日本、ドイツは、再処理工場の建設が遅れたため、商業ベースでイギリス、フランスに委託して再処理を行っている。海外に再処理を委託する際の条件としては現在、再処理後にすべてのものを自国に引き取ることが求められ、プルトニウムとともに放射性廃棄物を持ち帰ることが義務付けられている。プルトニウムに続いて返還廃棄物と呼ばれる放射性廃棄物もガラス固化体にして日本への持ち帰りが始まった。（写真5）



写真5　返還廃棄物の輸送船「パシフィック・ピンテール号」

現在の再処理はピューレックス法により行われるのが一般である。このピューレックス法は本来軍事技術であり、プルトニウムを純度よく分離抽出することができる。もしプルトニウムの組成が原爆級のものであればそのまま核兵器転用が可能なものである。このため、使用済み燃料の再処理はプルトニウムに象徴される核戦略物質を対象にするため、常に核拡散といった軍事利用の側面を抜きにしては考えられなかったところに不幸がある。恐らくこの問題さえなければ、あるいはこの問題を世界的レベルで解決できれば原子力の平和利用は社会にもっと容認され、支持されるところであろう。

世界には現在の核拡散防止条約を固

定的に捉え、最悪の場合、濃縮や再処理は現在の核保有国に限定すべきとの議論がある。これは日本やドイツのような非核保有国で原子力先進国として原子力の平和利用を目指している国々からはもちろん、原子力開発に意欲を示す国にも容易に受け入れられるものではない。

しかし、プルサーマルの方向では整合性の議論のように放射性物質の消滅の観点は入れられないので放射性廃棄物の処理・処分を前提とすることは当然である。

それでも、再処理しないで保管廃棄を考えるより、使用済み燃料は再処理するとする考え方が資源の有効利用の観点からだけでなく、今後のエネルギー開発に強く要求される環境適合性の点からも明らかに環境に与える負荷が低減できる利点があり、より開発に論理性があるように思える。

しかし、いずれの場合もウラン238の持つ潜在的エネルギーをプルトニウムにして使う能力が小さく、このままでは資源量からみても石油燃料と同等でしかなく、この形でリスクを抱えて開発する意味があるのかという議論も出てくるだろう。

これまで燃料サイクルの完結はプルトニウムを積極的に利用する高速増殖炉の実用化があって初めて可能だと言われてきた。当面はプルトニウムの消極的利用が続くと思われるが、軽水炉を中心としたＭＯＸ利用は長い目で見れば過渡的利用形態と言わざるを得ないだろう。軽水炉ではプルトニウムを再処理しながら何回も繰り返し使用することはできない。二回程度が限度だと考えられるので、当面はともかく将来的には調和の観点を強調し、「自ら整合性ある原

子力システム」の実現へ向けて全体のバランスがとれるような形で問題の解決をはかるべきであろう。

高レベル放射性廃棄物とゼロ・リリース

自然と技術の協力

さて、現在脚光を浴びている返還廃棄物にしろ、今後日本の再処理工場で将来出て来るであろう放射性廃棄物にしろ、その中味は細かいところで差はあっても図18のようなものになろう。これらは現在、ガラス固化体（注II-9）にして地層深い所に廃棄物として処分し、放射性物質を安全に社会や環境から隔離しようとしている。

地球の歴史を見ると、地球は太古から大量の放射性物質を地中、海中を問わず自然の中で安定して蓄えてきていることが分かる。温泉などはこのような状況の一つである。また地層、地殻の歴史を見てもガラスが形態として最も安定していることが分かっている。深地層という、地表の環境に影響を与える恐れがほとんどない自然のバリアの中にガラス固化体のように放射性物質の移動性や拡散性を極端に低下させた人工のバリアを重ね、放射性物質を隔離し、安全を確保しようとするのは一つの選択であり、科学技術的観点からは決して間違っていないし、

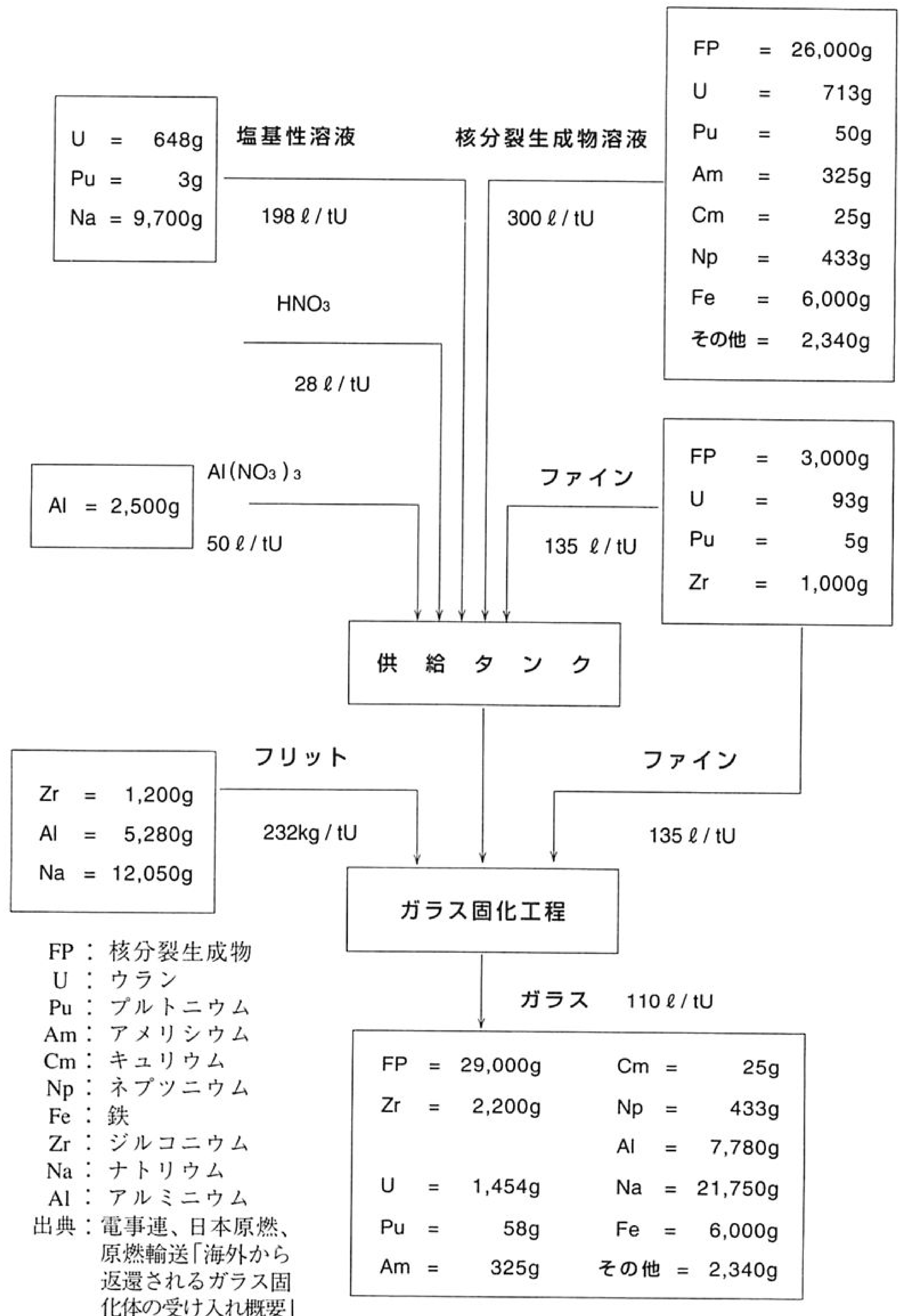


図18　ガラス固化体の成分

実際上ゼロ・エフェクト（無影響）の立場に立って十分安全に処分できるものと考えられている。

しかし、このような工学的安全の考え方は、現在必ずしも社会受容性を得るには至っていない。放射性物質という心理的にイメージの悪いものに何らかの人為的操作を加えて地中処分することは本来社会受容性の得にくい話であるし、後に述べるように原子力の安全を考える上で技術に最低限の信頼を置く必要はあるが、地球の地層という全く非日常的、非経験的な場所で人の寿命よりはるかに長い期間放射性物質を安全に保持することを、技術的には加速実験や地球の地殻の安定性から説明できるとしても、これを一般常識のレベルで社会に話しかけることは容易ではない。このような何世代にもわたるタイムスパンを持つ超長期技術はこれまで古代建築や遺跡等で結果的に経験している場合を除いて、人類文明はほとんど経験したことがないためである。本来、技術は経験的要素と何らかの実績を持って社会に容認されてきたことを考えると、高レベル放射性廃棄物の処理、処分について社会が信頼感を持つには時間がかかるかもしれない。

このように使用済み燃料、プルトニウム、放射性廃棄物等は、原子力開発の当初からいずれ具体的対応が求められていた事項であり、地道な研究開発が続けられてきたが、現実の課題となるに及んで、社会の大きな関心を持つ所となってきた。この対応は技術的には現実的方法として着実に開発が進められていても、社会的に受容されるには理解を求めての一層の努力が必

要と思われる。

しかし、決して悲観的になることはない。先人達は当初、全くといってよい程知られていなかった原子力を社会に導入し、社会の理解を深めながら原子力発電をここまで定着させ実績をあげてきた。高レベル放射性廃棄物の処理、処分を安全にかつ安定に行うことがこの延長線上に存在する課題であり、人類の将来の平和と豊かさをもたらすために重要であることを自信を持って誠実に語りかけていくことが社会の信頼を得る上で何にも増して重要と思われる。

原子力用語の多くが利用の観点に立って造語されたものである。再処理も使えるものは使うとの意味だが放射性廃棄物のような言葉は正にそれの代表的なもので、大変な厄介者ですと言っているように聞こえる。しかし、これは元素や物質の混合、分離についての現在の技術レベルから見てのものであり、調和を重視した長期展望に立てば放射性物質消滅の観点から研究開発の目標の再構築につながる。また同時に調和を優先する立場に立てば長期にわたる高レベル放射性廃棄物の監視をただマイナス面の克服と決め付けるだけでなく、一方でそれの持つ放射能とエネルギー、更に元素を資産として有効活用の観点から評価できるかどうか、環境との調和を中心にこれまで経済性の観点からは価値があまりないと考えられてきたことでも見直すことも必要であろう。

簡単に廃棄物というようなカテゴリーをつくることは今後難しくなるだろうし、望ましい方

向でもなかろう。しかし、技術的に深地層処分という一つの現実的解決方策を持っていることは心強いことで、調和を前提とした整合性を求める方向へ研究開発を展開していく上での支えともなっている。

現実から調和への動き

長期展望の中での現実的解決策

世界各地で「自ら整合性ある原子力システム」の構築と似た方向を目指して研究開発が進められている。しかし、アメリカの例で見たようにこれらの活動は何か原子力システムの将来像を明確にしてから、あるべき姿へのアプローチとして行われているものばかりでなく、その多くは現在の問題あるいは近い将来原子力で予想される問題を解決するためと位置付けられるものもある。従って、この辺の議論はその前提、目的を明確にしてから行わないと混乱を生むことになる。正に長期展望の明確化に伴う基本的課題の追求と現状認識の中での現実的解決策の模索の好例と考えて差し支えない。

「長所追求型」研究開発の代表が高速増殖炉開発である。人類をエネルギーの欠乏から救う可能性のあるものとして原子力関係者が期待し、夢を託した。ウラン238をプルトニウムに転換

して天然ウランの持つエネルギーを最大限に取り出そうとすること、および高速中性子の役割が大きいこと等を考えると現在の高速増殖炉は整合性の要件がすべては満たされておらず、燃料増殖に大きな目標を置いているが、その内容において「自ら整合性ある原子力システム」へとつながるアプローチ線上に存在するものとして科学技術的に位置付けることができる。

このようにプルトニウムは、エネルギー資源確保の観点からは不可欠な物質であるにも拘らず、現在の状況の中ではそのネガティブな特性が議論の中心になっている。国際政治上は核兵器転用の可能性が問題視され、また放射性物質としてアルファ線（ヘリウムの原子核）を放射するために政治的、社会的受容性を欠く部分がある。このネガティブな課題の解決に主たる焦点を合わせての議論からは当然プルトニウムの蓄積量に制限を加えるために原子炉内での燃焼による減量あるいは消滅を図ることになる。これは「高速増殖炉をプルトニウム燃焼炉として利用」あるいは「軽水炉でのプルトニウム燃焼」ということになる。

このように現在世界のいくつかの国で研究開発が進められているのはむしろ増殖よりも放射性物質の燃焼を中心とした焼却炉の概念である。これは現在、短期的にエネルギー需給がゆるみ、その結果原子力発電の需要が鈍化し、増殖能力のない軽水炉のようなウラン235消費型の原子力発電で十分対応できていることによる。

アクチニド燃焼炉

原子炉の運転を続けると必然的に使用済み燃料が原子炉から取り出されることになる。軽水炉の使用済み燃料組成は図19に示す通りであるが、燃焼度によっても多少変わる。高温ガス炉、重水炉、高速炉ではもちろん異なった組成になる。使用済み燃料を再処理すると、このうちプルトニウムのほとんどと未燃焼のウランが取り除かれる。その残りを高レベル放射性廃棄物と呼んでいる。放射性廃棄物の元素の放射能の潜在的危険度を時間変化も含めて超ウラン元素と核分裂生成物に分けて示すと図20のようになる。この図は前の図16を分かり易くしたものである。

高レベル廃棄物を出さないようにすることが「自ら整合性ある原子力システム」の目標であるが、そこに至る技術開発の過程で放射性廃棄物の潜在的危険度を、格段に下げることが考えられている。例えば超ウラン元素は半減期が長いため、潜在的危険度は時間がたってもほとんど変化しないので原子力システム内を再循環させ、原子炉の中で核分裂を起こさせることでシステムの外に出さず、潜在的危険度を大幅に減少させることを考えている。

「プルトニウム専焼炉」や「アクチニド・リサイクル炉」の概念は整合性の要件をすべては満足していないが、高速中性子による超ウラン元素の良好な燃焼特性が期待され、アクチニドの燃焼によって放射性物質の消滅処理を目指している。これは同時に新しい再処理方法を求めることになる。

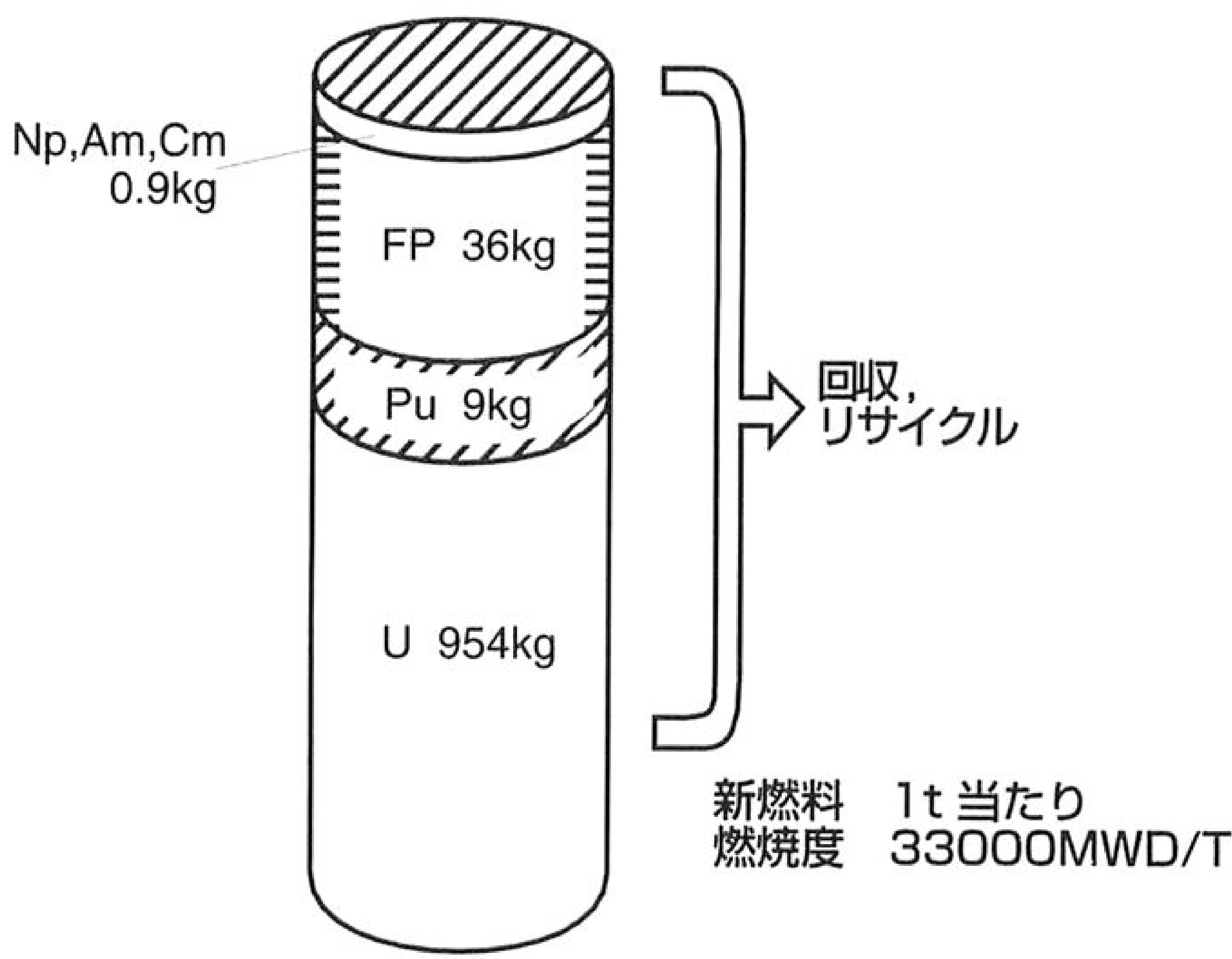


図19　軽水炉の使用済み燃料の成分例

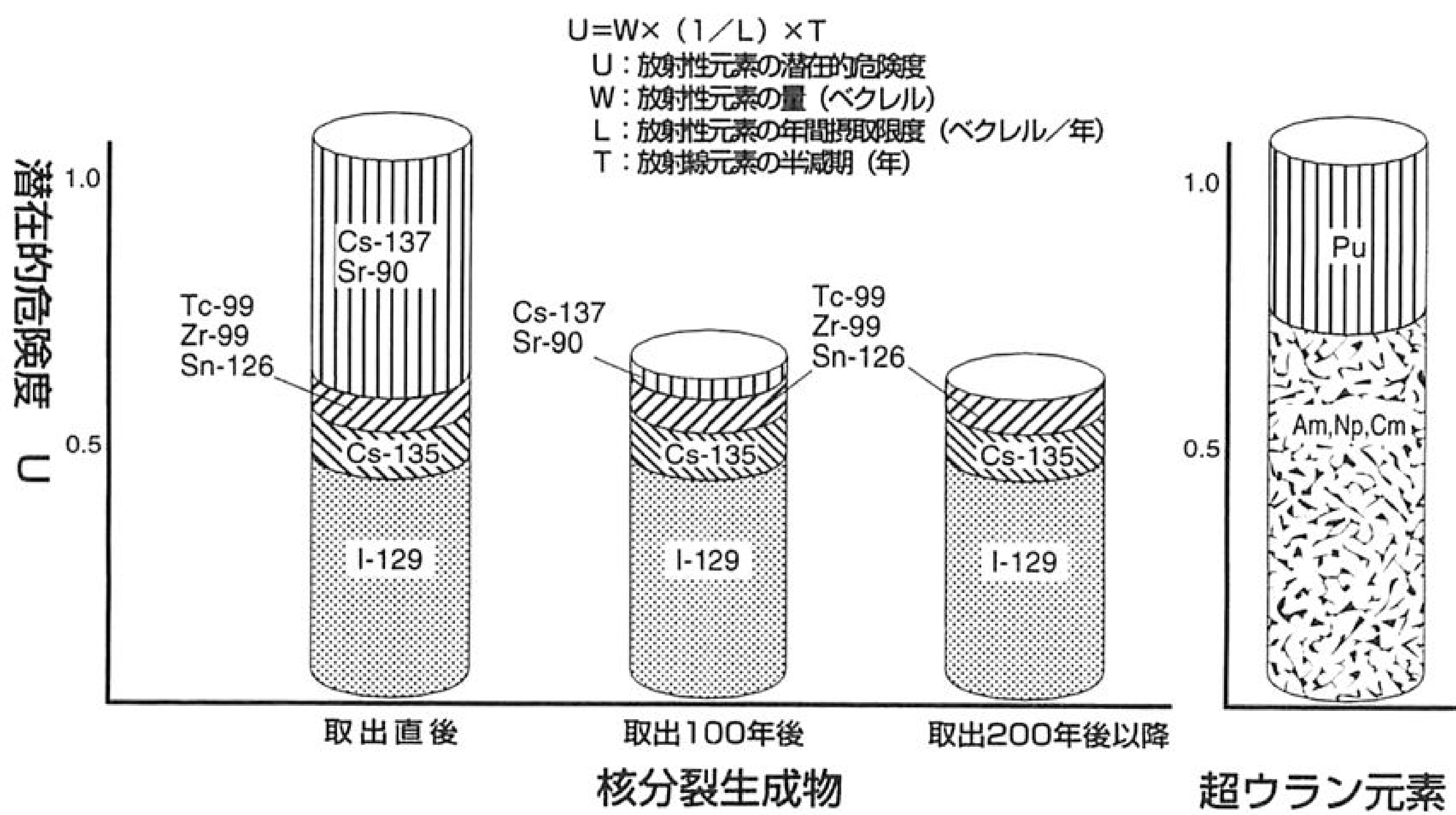


図20　核分裂生成物と超ウラン元素の潜在的危険度

ピューレックス法の持つ本質的問題を解決するために超ウラン元素を原子炉内で燃焼させた後必要な純度で分離し、プルトニウムを純粋な元素としては抽出しないような再処理技術が研究開発の対象となっている。軍事技術の平和転用は、やはり軍事との距離が離れているか、軍事との直接の接点がない形での転用が重要であることは言うまでもない。

技術開発の観点に立てばこのようにプルトニウム増殖とアクチノイド燃焼は共通の基盤を持ち、この二つの特徴のうちどちらを先に、あるいはどちらの特性をより発揮させるかは原子力システムの適用の仕方で決められるものと考えられる。更にこの両者はいずれ原子炉の中で同時に行われることになる。

一方、核分裂生成物についてはストロンチウムやセシウム等は原子炉の中で中性子と反応しにくいが、半減期が短く一〇〇年も経過すればその放射線は減衰する。従って中間目標として、インパクトの大きいテクネチウム99やヨウ素129を原子炉の中で反応させて非放射化することを考えれば潜在的危険度は格段に小さくなり、長期間の管理も人間の寿命と同程度になり社会受容性も得易くなろう。

核分裂生成物の非放射化についても原子炉やあるいは加速器によって核反応を起こし、その潜在性危険度を下げる計画がある。

長期展望と現実の課題との相互関係を調和させ、技術開発は長期展望に沿いながらもこの技

術をその開発途上で現実の課題解決のために応用する。本来技術開発とはその応用を狭い範囲に限ることにならないのは当然で、先進国としての技術開発の姿勢でもあろう。

第三章

不安のない原子力を求めて

5 合理的安全の構築

原子力に対する不安

入口論・建前論としての安全

エネルギー不足に悩み、石油に代わるエネルギー源を求めた段階から見れば、現在は原子力発電のほかに使い勝手がよく、また石油に比べて炭酸ガス発生量の少ない天然ガスの受け入れによるエネルギー資源の確保が先進国中心に進んでいる。この結果、長期的にはエネルギー資源に対して余裕があるとは決して言えない状況の中でも短期的には需給関係に余裕を生じ、エネルギーの量的確保に続く質的向上への努力を世の中は期待しているように思える。これは、平穏で豊かな二一世紀への期待と考えられる。

予想される高齢社会、高度情報社会に不安のない良質のエネルギーとして原子力エネルギーを定着させることが必須な条件と考えられ、従来のようにエネルギーの量的確保による需給バランスを図った段階での必要性と安全性の枠の中での議論だけでは社会受容性を得るには不十分だと理解しておくべきであろう。むしろ原子力をクリーンエネルギーになり得るものとして、

その必然性に加えて不安の少ないエネルギーとしての特性を強調する中で社会への定着を図ることが重要である。

不安のないエネルギーとして原子力を位置付けていくことが今後必要なのは、先進社会、高度情報社会の中では専門家に判断をゆだねる形での合意形成は難しいと考えるからである。

社会での安全の議論は入口論であり、かつまた、建前論としての重要性しか持っていなかったとする考え方が一方にあるのをあながち極論とも言えないと思われる。むしろ、安全をより一般的なレベルで意思決定の重要なファクターとして位置付けるならば、専門家内の議論から、より普遍化した理論へと展開していくことが必要であろう。そのためには現在の原子力開発の中での安全最優先の考え方から出発して、将来の不安のない原子力を展望し、現在の安全に対する社会の認識との間に見られる相違を明確にし、分かり易い、日常性の中で、容認できる安全論理へと展開していく必要がある。

不安の正体

原子力に限らず巨大科学技術の宿命は、その科学技術的特徴に心理的要素を付加されると、日常性の乏しい世界での不安につながることは避けられないことである。これが現在の原子力安全の世界であろう。日本の原子力開発が安全確保を最優先課題として取り組み、これまで安全に関してはまず、十分な実績を残し、人的災害が皆無だと言っても差し支えないのに、社会

は依然として原子力に不安を覚え、容易に原子力技術を容認しようとしていない。原子力は不安のない、安心できる総合科学技術として社会に容認される努力を技術的側面からだけでなく、社会学的、心理学的側面からも進めていく必要があるように思える。このためには、原子力安全の目指す方向と目標を設定し、長期展望の中で原子力安全の質的変革を目指し、社会に優しい分かりやすい安全論理で語りかけていくことが大切であろう。このためには、原子力に対して一般社会の持つ不安の正体を分析することから始めることが重要であろう。

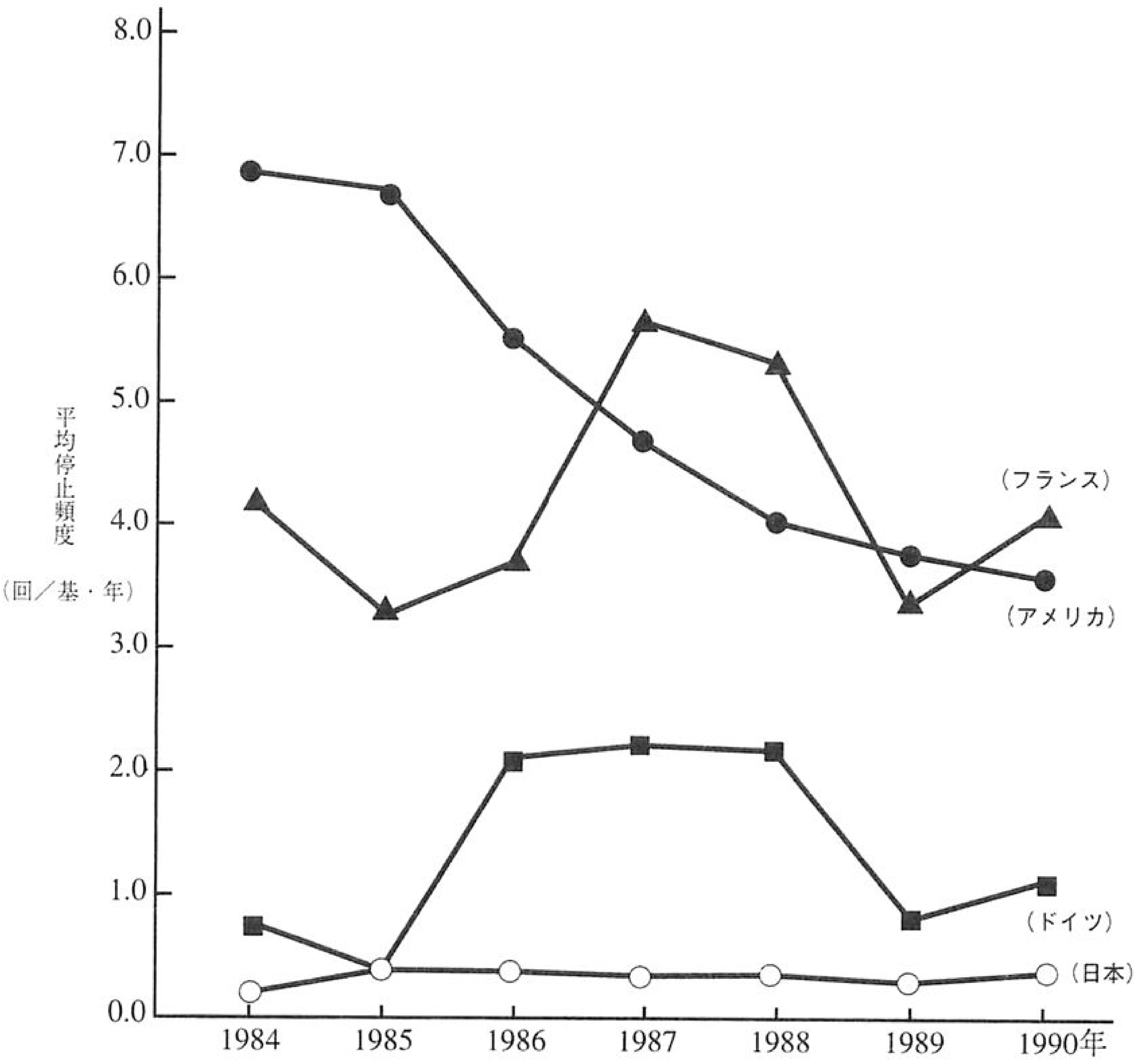
不安の正体を一言で言えば情報不足であろう。世界でも日本でも原子力を正確に理解し、その存在を容認してもらうために関係者は相当な努力をしている。しかし、原子力発電所の見学、原子力PR館の設置、講演会の開催、原子力資料の配布等々、官民共に努力している現状がある一方、原子力を危険とし、人類と共存できないとし、社会への原子力の導入は認められないとする情報も数多くある。この原子力の安全に関連した情報は事実を正確に伝えていないものもあるが、それでも長期的にはともかく短期的には世論構築に大きな役割を果たすことになっている。

日本でもスリーマイルの事故（注Ⅲ-1）やチェルノブイリの事故（注Ⅲ-2）のように原子力安全の観点から重要な外国の事故の情報に限らず、国内の事象についても賛否両論互いに相反するような見解が出された。伊方1号炉での出力調整試験（注Ⅲ-3）、原電敦賀1号炉での廃棄物貯蔵建屋からの放射性物質の漏洩（注Ⅲ-4）、浜岡1号炉のポンプ停止（注Ⅲ-5）、福島第二3号炉

でのポンプ溶接不良（注III-6）、美浜2号炉の蒸気発生器伝熱管破損（注III-7）、志賀1号炉のポンプ停止（注III-8）等が社会的に多大の関心を持たれ、原子力の安全確保の現状について論議された。この情報の中心となったのがマスメディアを通じてのものであった。

情報は果たして正確に冷静に報道されたかと言えば、これは人々によって受け止め方が異なるであろう。これは安全確保の目的と同時に基本となる物理現象がどれだけ一般に認識されているかによる。これだけの長い年月にわたり原子力の安全が社会的に論議されながら、何かが起こる度に同じような反応がくり返されることに、原子力関係者はうんざりしながらも平身低頭を繰り返している。彼らのつぶやきの中味は「これまで日本は唯の一度も事故によって原子力発電所周辺の公衆や環境に影響を与えるような放射能洩れはないのに」とか「今まで日本で起こった故障や事象は拡大して事故につながるようなものではとてもなかったのに」となるだろう。しかもマスメディアの対応が早すぎて技術的に詰めてからと思う時間的余裕が与えられなかったのが実情だろう。

筆者が見る限り、日本の安全のベースは異常発生の防止に主点が置かれ、異常の発生数は世界的に見て少ない（図21）し、これまでの異常発生の場合でも適切な措置がとられている場合がほとんどで、異常の拡大した場合はもちろん、拡大の危険性のあった事例もないと判断できる。大きな事故には前兆事象がいくつか見られるのが普通だと言われ、スリーマイルの事故の



注）定　　　義……計画外停止は故障・トラブル等により予定外に運転を停止した場合であり、外部要因による停止等を含む。
　　対 象 範 囲……主要国の軽水炉のみを対象とした。
　　対象ユニット……商用運転開始以降を対象とし、基数は対象年末におけるユニット数とした。
　　データソース……IAEA「OPERATING EXPERIENCE WITH NUCLEAR POWER STATIONS IN MEMBER STATES」

出典：資源エネ庁「原子力発電便覧'93」

図21　主要各国の原子力発電所の故障・トラブル等による停止頻度推移

際も調査結果の示すところであったが、日本の場合には十分安全の実績があり、これからの社会での安全の論議は確率論的リスク論もさることながら実績をベースにしたものにできるのではないかと考えている。現在日本には五〇基の原子力発電所が稼働中であり、電力の約三〇％を供給している。

どれだけのエネルギーを原子力に依存するかは、他のエネルギー源の供給可能性、安全性、経済性、環境適合性等との関連で最終的には決められるものであるが、環境適合性の点からは原子力に有利になろうし、近い将来環境税のような形で環境保護の政策がとられるとなれば、その第一の対象は炭酸ガスの排出になると考えられるので経済性の観点からも原子力は化石燃料に比べて有利となる可能性も持っている。

さて、実績をベースに原子力の安全を見る場合、これまでの異常や故障の発生件数とそれぞれの場合に安全上どのように対応したかを整理分析することに加えて、発生した異常や故障の中味があらかじめ行う安全の事前評価すなわち安全審査の内容を逸脱するものであったか、いずれも予想範囲に十分収まるものであったかを見ておく必要がある。

実績を見る場合、原子炉の多重格納のレベル、放射性物質の移動化のレベルを考慮に入れて見ることができる。日本の場合、多重格納のレベルの一部喪失は、美浜2号炉の蒸気発生器伝熱管の破断の一例がある。これまで燃料中の放射性物質の移動化は経験しておらず、美浜の事

故の際にも冷却材中の放射性物質のみが漏洩対象となった。日本では破損燃料棒を含んだままでの運転を行わないとするクリーン・コア運転を行っているため、環境影響の点からは十分無視できるものであった。

次に基本的な問題は、原子力安全の技術論のベースが深層防護の哲学に基づいていることもあって、安全の中心がこれまで工学的安全施設の性能を中心に議論されてきたことである。これは完全を前提にしない、工学には一〇〇%完全はないとの前提に立って前段否定の論理で議論を進めていくものであって、社会的一般常識でみれば常に何かが、すなわち不安と心配が後に残されることになる。巨大科学技術は原子力に限らず宇宙や航空機にしても低確率、高結果、言い換えれば事故の起こる確率は非常に小さいけれどひとたび事故が起こると被害が大きいものになるとの一般的特徴を持っている。ここに原子力も巨大技術としての宿命から脱し切れず、社会に分かり易く語りかける安全論理を構築できていなかったと言えよう。

しかし、同じ巨大技術と言いながら宇宙や航空機に比べて原子力の安全の本質はいつの場合でも原子炉を停止し、冷却すれば安全が確保できる所にあり、宇宙ロケットや航空機のように飛行中にエンジンを止めてしまうこと自体が安全を損なうのと根本的に異なる。この原子力安全の特徴を生かせば社会的により分かり易い安全論理が構築できるのではなかろうか。

いつでも「止めれば安全」という安全上の特徴を持っているものに自動車があげられる。日本でも年間一万人を超す死亡者を出している自動車事故も、つき詰めて考えれば緊急時に車を

止めることができなかったためであろう。車は原子炉のように自動停止装置がなく、判断は常に運転者に任されている。自動車には自動追突防止装置が付いておらず、また走行停止に関する固有の制御性がない。エンジンブレーキだけでは不十分なように思われる。

リスクの中味

年間一万人の事故死ということになれば、日本人一人が交通事故で死ぬ確率は平均的に毎年一万分の一程度となり、日本人の平均寿命が八〇年として人生を自動車事故で終える確率は一%に近いことになる。自動車事故が運転者を含む同乗者中心である間は、利益を得る者と不利益を受ける者とが同一だとの考え方があるいは成り立つかもしれないが、直接関係のない第三者を巻き込むこともある。この場合を原子力論議の中にあるように利益者と不利益者が異なる、あるいは都会人の利益のために地方の住民が犠牲になるとの批判的意見と同様の性質を持つことになる。また、幸い自動車事故で死亡しなくても長年後遺症に悩むこともある。これも原子力の晩発性疾患との関係に似ている。

両者の最も大きな違いは、自動車の場合は確率空間でのリスク予測ではなく現実の統計データに基づいたものであるのに比べて、原子力の場合は具体例がほとんどない。軽水炉の実績で言えばスリーマイル事故も含めて直接放射線災害による死者はなく、ゼロと考えて差し支えない。日本の実績もゼロである。従って原子力の場合は安全確保の方策を技術的に具体化する上

での安全に対する最低限の要求としてのリスク予測であるということである。自動車事故は高確率であるが、低結果だから容認できるというのは無理があるように思える。現実に積み上げ、集計すれば明らかに高結果であり、確率と結果の積も決して小さくないことを認識する必要がある。

このように技術の安全上の特徴、それに対する安全対策について議論することは、理解しようとする意図さえあれば難しいことではない。自動車の安全も原子力の安全もその第一歩で最も重要なことは「止める」ことであるからである。

しかし、自動車の安全と原子力の安全を社会的にも同一の性格を持ち、同等に理解されていると考えることは許されない。自動車は現代文明の申し子と言っても差し支えないのに比べて、原子力文明は未だ構築の途上にあり、原子力発電はその尖兵として石油文明の中に入り込んできたいわば異質分子とも言える。そのため、後者の日常性のなさは日本のように国民の五〇％以上が自動車の運転免許を持つ場合と、二千人にも満たない原子炉運転の有資格者との比較でも明らかで、それを克服するためには分かり易い安全論理が必要になる。原子力はここ当分異質分子であることからは解放されず、それなりに謙虚さと努力とが必要であろう。

原子力の原罪

社会が経験した原子力安全の出発点は、不幸なことに原爆とそれに随伴する放射性物質・放

射線にあった。原子力の安全について、原子力関係者はまず原子炉は原爆にならないことを訴え続けてきた。さすがに現在日本では、原子力発電と原子爆弾とは基本的に異なるものとの認識が社会的にも進んでいるが、原子炉はそれでも巨大なエネルギーを内蔵していると考えられている。一方、放射性物質・放射線・放射能についても多くの説明がされてきたが、放射能という言葉に対する人々の心理的反応に如実に示されているように、これを冷静に理解しようとする状況が設定されず、放射性物質と人体との関連について十分に理解が進んでいるとは思えず、不安を解消する段階にあるとは決して言えない。目に見えず、耳に聞こえずと五感に訴えることのない放射線の性質はいかにも無気味ではあろうし、一旦否定的見解に取り込まれると不安は限りなく拡大される性質を持っているように思える。

人類が地球上に出現して以来、自然界の放射線の中で生存を続けてきたことからの判断やホルミシス効果(注Ⅲ-9)のように疫学的にプラスの要因もあることを訴えても、これまで十分な成果をあげたとは考えられず、未だ原子力文明成立の必須条件が十分満たされていないように思える。

原子炉の中には巨大なエネルギーと大量の放射性物質が内蔵されており、普通に運転している分には安全は確保されているが、一旦大事故が発生するとエネルギーの異常解放によってこれらの放射性物質が無制御に放出される危険性があるとの、原子炉の持つ潜在的事故ポテンシ

ャルに基づく議論がある。これに対して、原子力の安全議論は必ずしも平易にその安全性を人々に説明できず、社会に浸透し容認されるところには至っていない。事実、反原子力の論点はここを出発点にして原子力が人類と共存できないとの論陣を張ってきた。現在なお一般人の気持ちの奥底にはこれに近い不安が潜んでいるかと思えるが、原子力開発のこれまでの歴史はチェルノブイリ事故を除けば、悲惨な事故を経験しないできたことを見ると、潜在的危険性を抑制できる機能を現在の原子炉は自ら持っていると考える気持ちも一方にあるように思われる。

自然災害と原子力

安全神話の崩壊

スリーマイル事故が発生した時、「安全神話の崩壊」という言葉が使われマスメディアの一つの論調を構築した。平成七年一月に発生した阪神大震災で高速道路が無残に崩壊し、また新幹線の鉄橋が崩壊した時、再び「安全神話の崩壊」なる論調が現れた。技術不信を伴う響きがある。今回の神話崩壊の論拠はロサンゼルス地震で高速道路の損壊の大きさを見た日本の専門家が「日本の場合にはこんなことは起こらず安全だ」と批評したことにあるらしい。

人類文明はその進展とともに多くの複雑なシステムや構造物をつくり出してきた。巨大技術

もその典型的な例であるが現代の生活は科学技術の所産の中に存在していると言っても過言ではなかろう。このような状況の中で自然災害が発生すると、文明の所産が機能を喪失したり損壊したりして、生活の基盤が破壊され、生活が維持できなくなるだけでなく人命が失われる場合もある。自然現象に対する備えが不十分で災害が文明の所産のため拡大した場合は人災と呼ばれている。

社会や自然から受ける影響あるいは社会や自然に与える影響については、その可能性を評価し、あらかじめ対応策を考え、予防措置を講じておくことは現代の科学技術ですでに行われている所であるが、中でも安全最優先を標榜する原子力の安全対策はその代表的なものであり、原子力施設の設置に当たっては安全確保方策を講ずることが義務付けられており、国の安全規制の対象となっている。原子力発電所の安全審査を原子炉の型式毎にまとめて行うのではなく、発電所毎に行うのは、社会的、自然的条件が発電所の場所によって異なるためで、それぞれ立地点での条件を組み入れた安全確保対策が実施されている。耐震設計も立地点で想定される地震の強さに対応して行われるのは言うまでもない。

原子力施設の安全審査の中で、自然現象に対してどのような対応をしているかは意外に知られていない。何か事あるごとに話題になるものの、対応の中味を分かり易い情報として社会に伝達できる所となっていない。これまた、不安につながっているのかもしれない。阪神大震災

の際も多くの人々が原子力発電所の立地点で地震が起こったらと不安を見せた。これまで新潟、奥尻、三陸はるか沖地震の場合も同じような話があった。原子力関係者の中には地震の際は原子力発電所が一番安全だと信じている人が多い。社会の他の構造物と比較にならないほど耐震条件を厳しくしているのは確かであり、更に地震の大きさがあるレベル以上になると原子炉は自動停止するようになっているのは言うまでもない。

地震についての対策として一般の建築物は建築基準法に定める耐震条件を満足することが求められている。阪神大震災の場合も新しい建築基準法に準拠した建築物に被害が少なかったことや、岩盤に直接基礎を打ち込んだホテルや商店街、更には地下街の建物に被害が少なかったことが報告されている。また、事故報道の中で「原子力発電所並みの設計にしたら」との問いに「十倍以上の値段になるのでとても無理だ」と解説者が答える場面があったり、道路関係者と思われる人が「経済性を無視して高速道路はつくれない」と答える場面などが見られた。

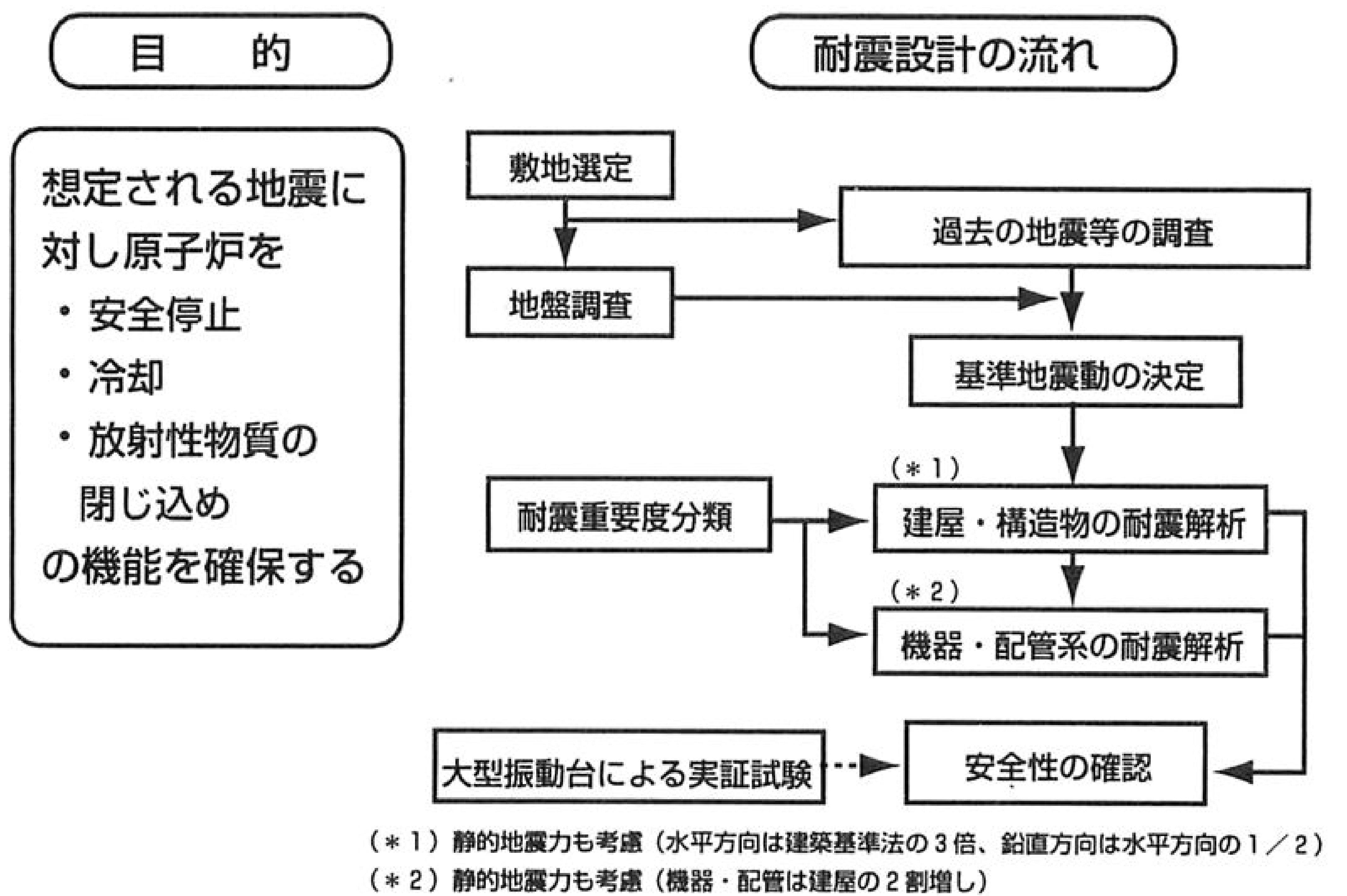
原子力発電も経済性がなければ成立しないが、安全が確保できることが前提となっている。原子力の経済性はその中に安全性を包含していると言った方が分かり易いのかもしれない。従ってこのような場面は原子力に限っては決して見られることはない。安全最優先の原子力施設は地震の対策も当然のことながら安全設計の中に取り込んでいる。他の産業以上に厳しい対策がとられている。

地震に備えて

原子力発電所の地震対策は、耐震設計にするか免震設計にするかの選択がある。日本の軽水炉はいずれも耐震設計を採用しており、強い岩盤に基礎を直接据え付けることにしている。従って立地に先立って立地点の地質や地盤の調査が行われる。岩盤が東日本は地下数十メートルに、西日本は地表にある場合が多く断層の有無の調査、岩盤の強度テスト等が行われている。地盤の形成等について千万年が単位になる話もあり、原子炉の中の中性子寿命の百万分の一秒の単位と時間にして一三桁も違う話が原子力発電所の安全には共存している。

地震そのものについてもその地域での過去の歴史を調査し、歴史地震を決めるほか、想定できる最大のものとして限界地震を決め、これに耐えられるように原子炉は建設される。耐震基準も一般の建築物とは異なって耐震基準をA、B、Cの三クラスに分類するほか、Asという原子力安全の基本となるものについては特別のクラスを設けている。一番緩いCクラスに建築基準法に定める強度を、Aクラスにその三倍の強度を要求している。(図22)

今回の阪神大震災は活断層の直下型地震で縦揺れが大きかったと言われている。原子力発電所の立地に当たっては周辺地域の活断層の調査が行われ、その上には設置しないことになっている。同時に、直下型地震も想定して設計強度を決めている。従って、これまでの知見の範囲では十分な耐震設計が行われていると思えるが、日本の原子力安全に対する姿勢は厳しさと同時に安全性向上のためすべてに学ぶ謙虚さを持っており、これまでスリーマイル事故やチェル



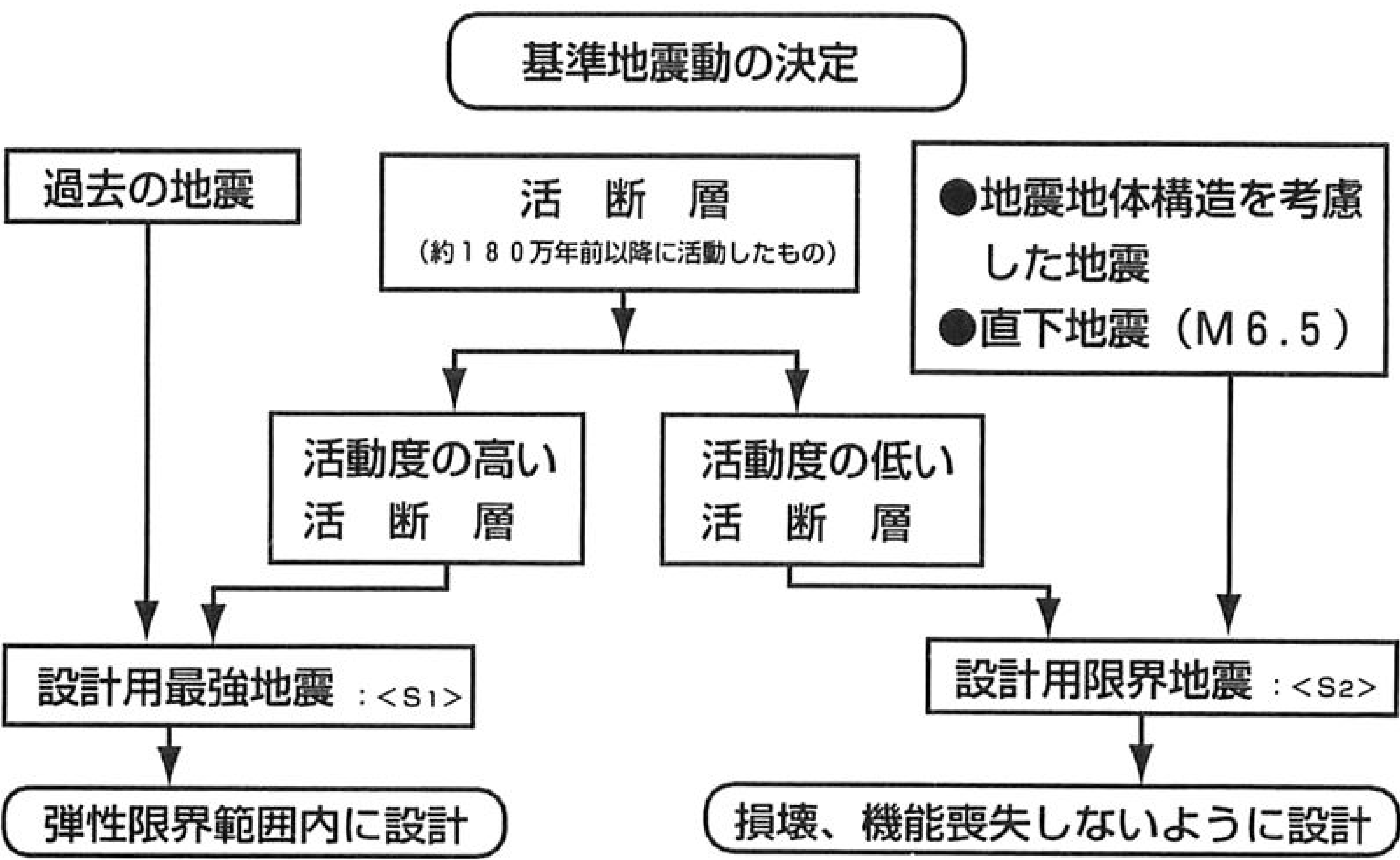


図22　地震に対する原子力発電所設計上の配慮

ノブイリ事故についてはもちろん、国内の事例でも原子力安全委員会は調査特別委員会等を設置して長期間にわたって事実を調査し、教訓を得るほか、関連の安全研究を実施し、安全性の向上に努めた。この姿勢は当然、今回の阪神大震災の結果からも教訓を得ることに心掛けることになろう。教訓はもちろん地震の詳細を知る事であり、破壊に至った建築物の原因分析は重要であるが、一方で難をまぬがれた建築物の破損に至らなかった理由も十分調査して、必要なら原子力施設の耐震設計に反映させることであろう。

原子力の安全に対する厳しい姿勢の基本は「災害が発生してからそれを補償するのでは原子力の社会受容性は得られない」とすることで、常に運転や設計に十分な余裕を持って安全を確保するよう心掛けることである。

スリーマイル事故そのあとさき—原子力安全の変遷

原子力安全の社会性

スリーマイル島の原子力発電所（写真6）はサスケハナ川の向うにあった。川の手前には鉄道線路が走っている。スリーマイル島原子力発電所2号炉（ＴＭＩ－2）の事故処理の現場には多くの貨物自動車が駐車してあり、時々人の動きが見えていた。川岸に座り込んでいると貨

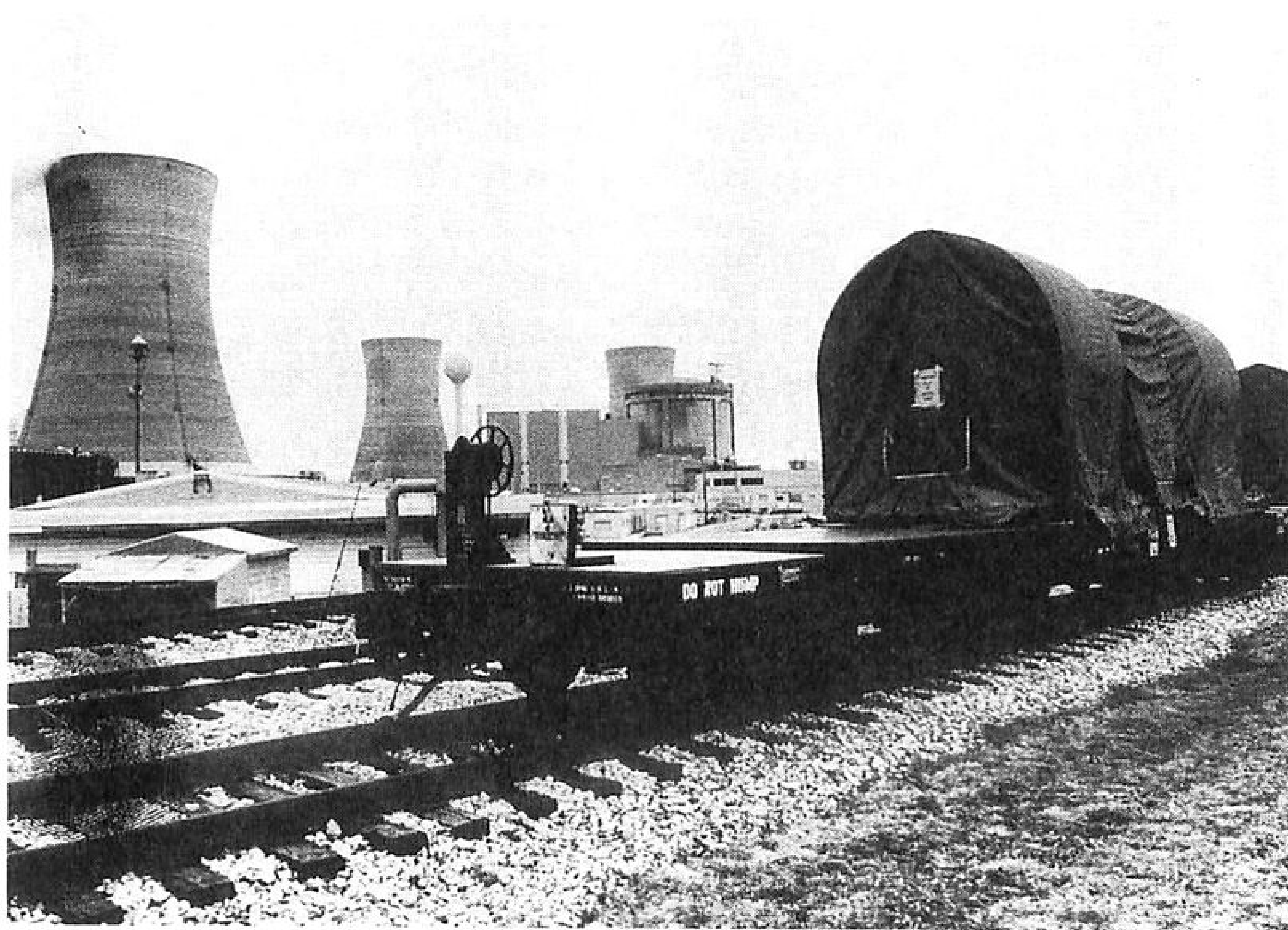


写真６　スリーマイル島発電所（中央奥が２号炉）

物列車が川沿いに眼下を通り過ぎて行った。

日本を出る前、この事故をどう思うかと聞かれて、ＳＬ―１事故（注III‐10）の際の格納容器の有効性のこともあり、今回も格納容器は健全であることがテレビ画像から判断できたので放射性物質の漏洩はないと思い、「軽水炉の安全を実証する事故だと考える」と言った途端反発された。

日本ではいまどういう議論にっているのかなとぼんやり考えていた。「今回は反対派の言うことが正しいと思う」と言った新聞記者の顔が思い出された。「放射性物質の放出防止が原子力安全の第一義的目的」と考える筆者に比べて、恐らく彼は原子炉の炉心で起こっている事故

の中味により多くの関心があったようだった。これまで親しくしてきた記者で時々会って話している気心の知れた人だったので、その人の口からこの言葉を聞いて社会の驚きを実感した。しかし、それからしばらくして会った時、彼は筆者の言った意味を分かってくれた。

スリーマイル事故はそれほど画期的な出来事だった。画期的というのは、巨大科学技術を社会的存在として文明論的視点からどう捉えるか、非日常的存在の持つ不安に対してどう対応するのか、これまでも原子力の一つの宿命として論じられていたものが一気に現実のものとなったことである。スリーマイル事故は人々が原子力に対して、特に原子力発電所の事故に対して持っていた予感を現実化させた。また、原子炉事故が現実に起こるものとして専門家の世界にもショックを与えながら社会全般に広がりを見せることとなった。

「原子力発電その必要性と安全性」を広報活動の前面に出して、原子力の安全設計を中心に決定論の立場から訴えてきたことに対して、起こるはずのない事故が発生したとみてマスメディアは一斉に「安全神話の崩壊」と論じた。科学技術が神話の中で語られるとは驚きであったが、設計安全の網の目をくぐり抜けての事故の拡大を捉えたものと理解できた。原子力の安全に対する社会の受け止め方にこの論調は大きな影響を与えた。しかし、安全とは何かを冷静に考えたとき、放射線災害に結びつかず一般公衆に実害がほとんどなかったことが神話の崩壊の中味だとしたらこれも画期的と言えるかもしれない。

スリーマイル事故と情報伝達

スリーマイル事故は、技術的には事故の時間的進展を中心に運転安全の重要さを認識させると共に、その後の膨大な実験や解析で原子炉内部で起こった事象の中味が明らかになり、炉心損傷事故の内容にまで踏み込んで大きな成果を上げ一つの決着を迎えたが、社会的、心理的にはまだ十分な決着が図られたとは、とても言える状況ではないように思える。この事故はまだ人々の心の奥底に何かよどみを残している。スリーマイル事故は、チェルノブイリ事故に比べて原子力安全の立場からは、その人身災害や環境影響を含めて大きな違いがあり、とても同列には扱えるものではないと判断されるのに対して、社会心理的に与えた影響から世界の二大原子炉事故として両者が同列に扱われる場合もある。

人類は時代時代で巨大技術に対応してきた。バベルの塔、ローマ水道、万里の長城、ケルン大聖堂等巨大構造物、更には大型客船、大型旅客機等があり、その中で経験した事故はわずかな例に過ぎないと思われるが、その存在あるいは事故は当時の限られた社会や時代だけでなく歴史的にも影響を残している。

事故の決着を社会的にどのように図るのかに定説はなく、もちろん原子炉事故の場合も特別これといって決まった方法があるわけでもない。ただ、情報公開が二一世紀には重要視されるであろうから、社会の冷静な判断を求めて分かり易い情報を提供することを心掛ける一方で、

どんな事故からも必ず教訓を得ることが重要である。事故が確率的に起こったとするのではなく、その本質である物理現象を明確にし、原因を明らかにし、その結果を設計・運転に反映し、安全の実績を蓄積していくことであろう。

スリーマイル事故についても、事故発生時の世界が驚愕した時の印象がそのまま定着してしまっているとすれば、少なくとも誤解を解く努力をしておく必要があろう。この際、時が解決するといった忘却に期待することは少なくとも正しくない。

社会的に認知されるべきことの第一は、やはりスリーマイル事故によって環境や周辺住民にどのような影響があったかであり、これを事実に即して伝えることであろう。

スリーマイル事故の結果については、米国環境保護局（ＥＰＡ）の公表によると周辺環境に事故に際して放出された放射性物質はもちろん、周辺環境を汚染したり、住民の生命、健康に直接影響を与えるほどのものではなく、個人被曝も一ミリ・シーベルト以下で日本人が普通に生活して自然界から一年間に受ける自然放射線量以下であったとされる。

この事実は果たしてどの程度社会的に認識されているであろうか。恐らくこれもタイム・スパンの違いで事故調査の結果を公表した時には社会的に関心が薄らいでいたのと、今更過去を掘り返すこともあるまいと情報伝達に積極的でなかったのと双方で、社会的に十分認識されているとは言えないであろう。

第二は、スリーマイル原子炉の炉心は全体にわたって崩壊しており、起こった現象は専門家の予想を超えるものであった。設計上の欠陥や運転員の不適切な対応もあって「冷やす」ことが十分行われず、炉心が大幅に溶融していた。しかし、炉心溶融が起こったにもかかわらず放射性物質の漏洩が少なく、事故の大きさと影響との間に直接の関連がなかったことはチェルノブイリ事故と比べて大きな違いである。この事実は軽水炉が臨界に直接関連した安全問題を持っておらず、冷却が安全確保の中心であることを示したのと同時に、軽水炉は放射能閉じ込め能力が高いという本質的特徴に加えて格納容器を現実的選択として設置してきたことが放射性物質の漏洩を抑えたと言える。

ここで原子力の安全の扱いに大きな変革を与えたスリーマイル事故の性格を振り返っておくことは、技術論の立場を超えて重要な意味を持っていよう。

設計安全と決定論

軽水炉の安全を工学的、技術的に捉える出発点はその安全上の特徴に着目しての高温、高圧の冷却材が流れるパイプの破断である。パイプの瞬時破断を起因事象として、その際に冷却材が流出する冷却材喪失事故（ＬＯＣＡ）を代表的安全課題として取り上げ、このような状態でも原子炉の安全を確保するために導入された非常用炉心冷却系（ＥＣＣＳ）の性能を保証し、ＥＣＣＳから混入される水によって原子炉を十分冷却して、燃料の溶融を局限し、内部の放射

性物質の漏洩を防止する設計対策を施すことによって安全を設計上確保することが目的であった。このように、決定論的手法によって軽水炉の安全確保を行おうとするのがスリーマイル事故以前の中心課題であり、設計安全中心の時代と呼んでよいであろう。

決定論的安全確保の考え方は、軽水炉のシステム構成や安全上の特徴から、万一の場合に起きるかもしれないと考えられる異常事象を選びだし、そのうち物理的性格が似ているものを包括して少数の代表的事象を定め、異常の発生防止、拡大の防止、影響の緩和の観点から、適切な工学的安全系統を備え、事故の発生に対しても安全が確保できるようにしている。これらを設計基準事象と呼んでおり、システム全体に安全確保の網をかぶせるところに特徴がある。固有の安全に加えて工学的安全設備を設置することで安全を確保しようとしている。更に同時に行われる設計基準事象に対する安全評価はこれらの安全系統を含めシステムの安全設計の妥当性を判断するのを主眼としたものである。

スリーマイル事故は異常が設計安全の観点から張った網の目をくぐりぬけて進展した事故で、固有の性質に加えて深層防護の第三レベルとして放射性物質を閉じ込めることを目的とした工学的安全設備、すなわち格納容器によって救われたもので、格納系の重要さを再認識させるとともに深層防護を中心とした安全の考え方の妥当性を示したものである。

格納容器はアメリカで早い段階から原子炉に設置され、SL－1事故でその放射能閉じ込めの有効性が実証されてからはアメリカを手始めに西側原子力プラントでは以前から取り付ける

ことが定着している。格納容器の設置目的は当然のことながら放射線防護の観点から、環境と原子力発電所とを隔離する最外殻の物理障壁として放射性物質の環境への漏洩を防止するものである。このため、内部および外部事故に対して格納容器の健全性を確保すると同時に、事故の結果格納容器に放出されるかもしれない放射性物質を閉じ込め、その移動性を低減して環境へのインパクトをなくすことが重要な役割となる。前者は事故の際の放出エネルギーに対し健全性確保が課題であり、多くの場合内部圧力の上昇防止のための手段を中心に研究が行われてきた。後者は格納容器雰囲気中の放射性物質の量の低減のため、付着、吸着、沈降および除去が主であり、放射性物質としては、ヨウ素、セシウム等の揮発性物質やキセノンのような希ガスを格納容器内に閉じ込め、その放射能の減衰を期待している。

設計安全から運転安全へ

社会の驚愕の一方で、原子力関係者、特に原子力安全の専門家はこの事故から多くの反省と教訓を得た。スリーマイル事故の反省の一つは、それまで扱われた事故事象がその評価に保守性を含み、かつ安全設備の妥当性を評価することが主目的であったために、原子炉で起こる現象の時間的経過を忠実に追うことがないところがあったことに対するものであった。この教訓は「設計安全」から進んで、実現象に近いモデルを使う最適ベースの扱いが重要であることを示したことで、「設計安全」に加えて「運転安全」が重要視される時代に入ったことを示した。

スリーマイル事故に際しての反省の第二は、工学的安全設備中心の考え方に対する反省でもあった。軽水炉には自らに備えられた多くの固有の安全性があるにもかかわらず、工学的安全性を中心とした設計の妥当性評価が主体となり、"Patch Work Safety"とか"Band-Aided Safety"と言われるような傷口に対してバンドエイドを貼るような対症療法的安全で、後追い型であるとの指摘が米国上院の技術評議局（ＯＴＡ）の報告書等で指摘された。このため「止める」「冷やす」の基本に戻って固有の安全を全面に掲げた安全を目指す方向が示された。この結果は固有の安全性や受動的安全性を重視した研究に発展していった。

更にスリーマイル事故の教訓は運転員教育ないしは巨大設備と人間との関わり、すなわちＭＭＩ（マン・マシン・インタフェース）の問題でもあった。事故事象の解析が、設計評価のために行われ、現象の時間経過を現実的に示した上での運転マニュアルの整備や、操作員の事故現象に対する理解等が不十分だったこと、更に中央制御室での表示が運転員に事故事象を適切に示し、その実態が把握できるようになっていなかったことなどの反省の上に立ってその後原子炉の状態を正確に表示するほか、テレビ等を活用して運転員の判断を支援するシステムを準備すること等の改善が図られてきている。

確率論によるリスク評価

一方、原子炉の持つ潜在的危険性そのものから出発して、その潜在的危険性がそのまま顕在

化された場合を扱ったものにＷＡＳＨ－740（注Ⅲ-11）がある。これはアメリカ合衆国議会で原子力保険に関してプライス・アンダーソン法（注Ⅲ-12）を制定する際の参考とすべきものとしてその評価結果が利用された。

この話は後に確率論的安全評価へと進展していく。確率論的思考はイギリスのファーマーにより導入された。その後宇宙ロケット（アポロ計画）の信頼性評価に用いられたイベント・ツリー（事象連鎖、注Ⅲ-13）とフォールト・ツリー（故障連鎖、注Ⅲ-14）のセットによる事故シナリオの確率論的表現を原子炉の安全評価に採用した、マサチューセッツ工科大学（ＭＩＴ）のラスムッセン教授が行ったＷＡＳＨ－1400（ラスムッセン報告、注Ⅲ-15）が有名である。この安全評価手法は決定論と異なって基本的には個々の事故事象のシナリオを追跡し、工学的安全設備の作動の成功・失敗を分岐点にしてその発生確率と事故結果を導出し、その積をリスクとして表現している。

確率論的安全評価手法はＰＳＡ（Probabilistic Safety Assessment）と略称され、「設計安全」に加えて「運転安全」を重視する立場から原子力システムの安全評価を行う上で優れた手法で、現在でも多くの分野に適用され、実績をあげてきている。「設計安全」の観点からは、個々の原子力システムの事故シナリオを扱う中でシステムの持つ弱点を抽出しそれを克服することができ、バランスのとれた原子力システムを構築していくところに大きな特徴を持っている。「運転安全」の観点からは、事故事象の進展を追跡する過程で運転員操作の成否を含めた

事故影響、シナリオの確率を明らかにすることで、運転員操作の重要性を明確にすることができる。このため、同一の設計思想に基づくものでもその具体的な設計・建設・運転方法によって個々の原子炉のリスクに差が見えてくる。ここでは共通性だけでなく個性も当然現れる。更に設計思想を異にし、炉型も違い、技術レベルも違うものに対しては、決定論での差の指標を具体的に数値で証明することも原理的には可能になる。この他、運転管理、事故管理を有効かつ合理的に行う方向への応用が今後進められることとなろう。

このように確率論的安全評価では、個々のプラントの特性を捉え総合的安全評価が可能であるが、ラスムッセン報告が発表された時、米国ではその手法の有効性よりも使用したデータおよび結果が楽観的だという理由で反論が続き、これを重要視しなかった。しかし、スリーマイル事故の発生によってこの種の事故が広い意味でラスムッセン報告の中で取り扱われていることが分かり、その価値が再認識され、その後多くの分野で適用されることとなった。これなどは、原子力安全に関する報告が、冷静な技術論の中で扱われる場合はまれで、社会的に非常にメンタルな、心情的要素を含んで議論されていることを示す好例であり、原子力安全の情報伝達や広報の難しさを同時に示していると言えよう。

図23はスリーマイル事故の前後の安全の考え方の変遷を示したもので、いささか複雑であるが、原子力安全全体を捉える上での参考となろう。

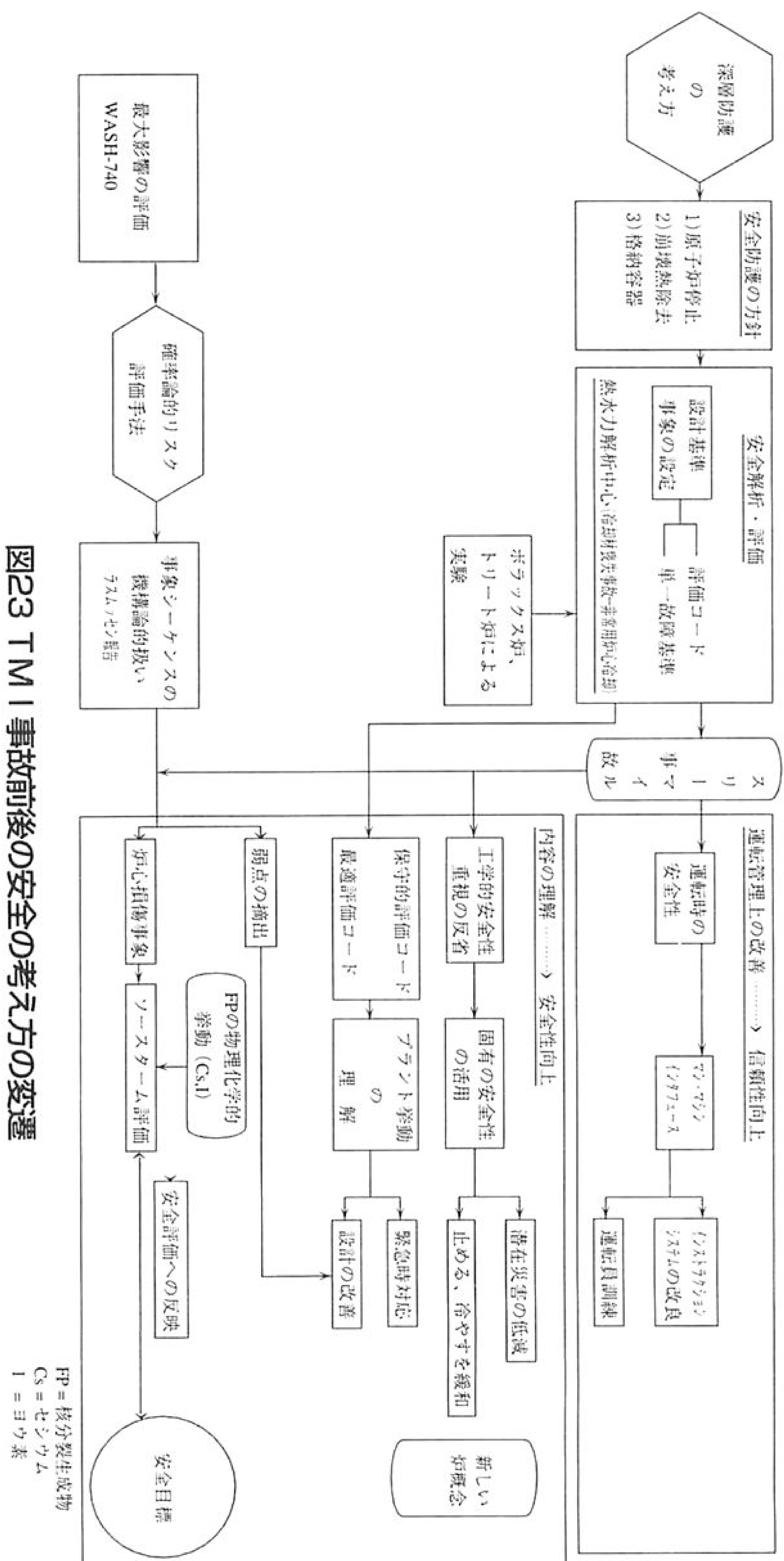


図23 TMI事故前後の安全の考え方の変遷

建前論からの脱却

文明を支える科学技術

人類は、地球上に現れてからこれまで、地球環境の中に文明を構築しながら生存を続けてきた。文明を支えたのは科学技術である。この事実を否定することはできない。今後のより良き将来のためにも、科学技術は人類社会に必然的存在ではあるが、それ自体絶対的存在ではなく、人類社会と調和を保つためには共存の哲学が必要である。人類社会と科学技術の共存の立場からは、観念論的安全だけで合意が得られるものでもなく、共存の安全論理を構築して実際の科学技術に具体的に展開応用していく必要がある。

科学技術はどんなものにしろ、安全に関する部分を含んでいる。交通、重工業、医学、農業、漁業それぞれ性格は異なるにしろ、人類社会と共存のための制約条件はある。そしてその中味も文明の進展に合わせて時代とともに変ってきている。しかし、安全が独立した形で論議され、安全確保が利用に優先して重んじられるようになったのは原子力が初めてであろう。アセスメントとか事前評価といった用語は、原子力分野に限らず、産業、環境、医療等に関連した分野でも使われるようになってきている。

人類社会への原子力の登場が原爆という大量殺戮兵器であり、それまでの想像を超える破壊力を持つものであったことから、原子力は利用の仕方によっては、自らの生存の基盤である地球そのものの破壊にまでつながる要因すら持つものと考えられた。現に世界には数万個の原爆が未だ存在すると言われている。このため原子力にとって安全論議は多面的であり、科学技術の範囲を大きく越えた内容まで含んで行われてきた。また、一面において極端な絶対論をベースにした議論が原子力の安全論議を不毛なものにした場合もないとは言えない。

原子力の安全を議論し評価する上での重要なポイントは次の二つの前提を認めるか否かである。「科学技術に対して最低限の信頼を置くこと」と「人類が地球上に出現して以来、自然の放射能の中で生きてきたこと」の二つである。この二つの前提を受け入れないと原子力のアセスメント、すなわち安全の評価は成立しない。特に技術そのものの全面否定は科学技術はもちろん、人類社会の存立すら危うくするものである。ただし、これは絶対論を排除し、事実上の安全へと短絡するものでは必ずしもない。科学的に排除できる異常事象については、当然絶対論で論議されるべきものである。技術をどの程度信頼するかはその発展段階および社会の成熟度に応じて変わるものであり、アプリオリにその程度を決められるものではなくて、それまで地道に積み上げてきた実績がその背景となろう。原子力開発も半世紀を経過した現在、安全の実績は相当あり、冷静に分析総合することが技術的に重要であることはもちろん、社会的にも

説得力を持つことになろう。

原子力で言えば、その社会的容認に当たって必要なことは原子力施設が存在し、自然環境や人類社会と調和するためには、「原子力施設の敷地境界を越えて周辺の人々や環境に影響が及ばない」こと、あるいは「周辺の人々に避難等を含む緊急の対応を事実上要求しない」ことを分かり易い安全論理と実績とで説明し、社会に納得してもらうことである。

ゼロ・リリースとゼロ・エフェクト

原子力の安全の究極的目標は、原子力の利用に伴って発生する放射性物質をいかなる場合も人類社会や自然環境から安全に隔離することである。これは科学的立場からはゼロ・リリース（無放出）の原則につながるが、技術的観点、特に評価の観点からはゼロ・エフェクト（無影響）と言った方が妥当であろう。すなわちゼロ・リリースの原則は分かり易い安全の立場からの究極的目標で、科学的可能性の検証等から設定されたものであるが、技術的には少なくともこれと同等と言えるものが達成されるべきで、これをゼロ・エフェクト（無影響）と表現することができる。安全の実績は両者の同等性を示す上で重要であるが、極低確率の事象が存在すると考えると実績だけでは未経験な事象の発生を完全には除外できないため、当然のことながら絶対的指標とはなり得ない。

周辺の人々や環境に影響が及ばないとの原子力施設の安全に対しての要求はいつの時代にも

変わることはない。ただ、その判断の基準はただ単に離隔のために空間的な広がりだけに期待するのではなく、大きな潜在的危険性の理論的排除に加えて最低限の科学技術は信頼し、また地球には自然の放射能が存在することを認めてのものでなければならない。放射能と人類の関係は、特にその人体影響を中心に次第に解明されてきているが、これに加えて原子力安全に関する知見の集積や技術の進展によって安全の中味をより具体的に、しかも本質論の中でより分かり易い形で説明することが必要である。分かり易い説明の基本は原子炉の中で異常時に予想される現象に対する知見を中心にしたものでなければならない。

原子力システムの安全確保に対する今後のアプローチの方向としては概念的に二つある。一つは先端技術を駆使して高性能の制御系統を含む工学的安全設備を設置して異常に対処するものであり、他の一つは自然法則に従って設計に取り込まれた原子炉固有の性質を最大限利用しようとするものである。前者の場合は原子力システムは洗練された高性能のものとなり、規模も大きくできる。

一方、高度に機械化されたシステムは原理的にはともかく、一般的には複雑で故障や誤操作等のほかにヒューマン・エラーの入ることを完全に排除できるとは容易に断定できないし、説明も容易ではない。後者は安全確保の諸機能を自然法則を主体に発揮させるものであるから、一種のドンキーマシンになり性能や出力規模にも限界があるが、信頼度は非常に高くなる。このように設計上の対策を工学的手段によるか、あるいは原子炉が本質的に備えた固有の耐性に

より多く依存をするかで安全論理の構成や説明の仕方が変ってくる。先端技術を駆使して高性能な原子力システムをつくり、確率論に頼ってその事故の発生確率が一〇〇万年から一〇〇〇万年に一回という低さに抑え事実上起こらないとするか、あるいは自然法則を中心として安全を考え固有の耐性からみて発生が想定できないとして、本質的な安全を主張するかである。現状はその中間に位置する段階でリスクの考え方を組み込みながらも、決定論的に意思決定を行っている段階で、事実上の安全をねらったものである。

リスクと安全研究

原子力安全技術の目標である「敷地境界を越えて人間や環境に影響が及ばない」へのアプローチは、あくまでも物理現象の解明とその結果の設計および運転への反映に求めなければならないことを承知しておくべきである。このためには、原子力の持つ、特に核分裂の連鎖反応の特徴を理解し、このエネルギーの発現形態を単に普通に運転されている場合だけに限らず、異常状態についても十分理解する一方、これまで少数例とはいえ、世界で経験したエネルギーの異常放出による原子炉の事故例をこの観点から分析し内容を明確にしておくことが重要である。

これまでの半世紀にわたる原子力研究、原子力安全研究は多くの成果をもたらし、原子炉で予想される挙動についてはその内容はよく理解されてきている。従って安全確保の主点は原子炉の中で何か経験したこともない未知の現象が起こることを前提としたものではない。これま

での安全研究や経験から現実に原子炉内で予想される異常の発生を未然に防止するか、万が一発生した場合にもこれを局限し、外部への影響を抑制することを考えている。このように原子炉の中で起こる現象についての理解は進み、原子力発電の開発当初にはクラス9事故（注III-16）として具体的にその中味は分析せず立地の妥当性評価の中に包括され、格納容器設計の余裕と敷地の広さでカバーしてきた事象群、一般に原子炉の空焚きと呼ばれる炉心溶融事故であるが、これに対してもその中味は次第に明確となり、発生防止や影響の抑制対策を設計の観点から講じるだけでなく、運転の観点からも事故管理対策を講じられる段階に至っている。

原子力システムの安全を評価し説明する方法としてこれまでに決定論的安全評価手法とリスク論をベースとした確率論的安全評価手法が用いられてきた。いずれも原子力システムを構成する機器部品が、常に完全でミスのないものとは考えないところから出発する点では同じである。

これまで大規模原子力システムの安全設計にあたって、工学的安全の立場からは原子炉の安全確保の基本である原子炉を必要に応じて「止める」「冷やす」、更に放射性物質を「閉じ込める」の三つの機能を信頼度の高い工学的手段により、発揮させようとしてきた。原子炉停止装置、原子炉冷却装置、放射能閉じ込め装置はいずれも原理の異なる方法によって多重化されており、その機能発揮が事実上保証されている。多重性と多様性を確保する結果、一つの故障を

想定しても要求される性能が十分発揮できると考えるのが決定論的安全評価の特徴であり、説明も容易である。これに対して確率論的方法はそれでも不完全さが残るとして、その度合を確率で表現している。この確率は特に安全系統に関しては極めて小さいものであるがゼロにはならない。このわずかな不確かさの影響を重ねて事故の進展した結果をリスクとして見る立場であり、合理的な方法に見えても一般の人々には必ずしも分かり易くはない。特に低確率・高結果の非日常的なところに、計算の上ではリスクが完全にゼロでなくわずかでも存在することになり、潜在的危険性に対する不安からなかなか脱却できない。

確率論的安全評価ではこのように保証された機能の発揮失敗の確率を定義し、多数の機能喪失を仮定しているが、ある事故の発生確率がある値以下になるとその事故は事実上起こらないとするものである。この値は恐らく時代によって変化するものと考えられるが現在は一〇〇万年に一回とか一〇〇〇万年に一回をすそ切りの数値に使う場合が多い。確率論によって原子力システムの安全を論じようとする場合は、その背後に技術の持つ故障・事故の可能性をベースとしたリスクの考え方がある。

リスクは何も科学技術だけが持つものでなく自然現象の中にも見られる。地震、津波、火山、台風、大雨等によって人命が失われたり、財産が喪失したりしている。科学技術のリスクを確率論的に表現しようとすれば事故の発生確率とその事故によって生じる被害の大きさの双方に関連したものになる。一番簡単には双方の積になる。これが小さい方がリスクが小さいといい、

同じ利益を社会にもたらすものを比べて優れていると言える。

また、発生確率が大きいものは被害は小さく、また大きな被害は発生確率が小さくないと社会はその科学技術を認めにくいであろう。このための考え方としてリスクすなわち発生確率と被害の積を一定にしたいとするのが等リスクの考え方である。

等リスク

一つの原子力システムに対してリスク曲線をつくることができる。例えば放射線被曝の制限値とその事故の発生確率の積をこれに置き換えると一種の安全要求になり、この値を一定にした場合が等リスク曲線である。原子炉の安全を事故の大小にかかわらず、事故の大きさとその発生確率の積、すなわちリスクが一定になるように設計上要求することは工学的安全設備や固有の安全性の採用の配分を適切にすることで可能であろう。しかし、果たして放射性物質の漏洩が全くないか、あったとしても自然界の放射能に比べて更に小さいところまでリスクがあると考えるのか、もしそうだとしたら原子力の導入はご免こうむりたいと考える人もいよう。最近調査研究の進み出したホルミシス効果に見られるように低レベルの放射線は刺激効果もあって人体に有益であるとする見方もあり、そうだとすればリスクと考えてきたことは逆にメリットとして評価されることになる。

一方、同一リスクとはいえ、またたとえ発生確率は小さいとはいえ、潜在的危険性そのものに

近いような影響を持つ大事故の発生が理論的に排除できないのであれば人々は不安から解放されず、これまた原子力の容認は難しいものとなりかねない。

確率論的安全評価では工学的安全機能の作動失敗確率を定義し、多段に機能喪失を仮定しているが、この確率論的手法は確率の表現が数学的であるため、その事故が起こるかどうかといった素朴な議論に対して、起こりにくさは表現できても潜在的危険性を超えたところにしかゼロは存在しないところに説明の難しさがある。これは、例えば数学のガウス分布では標準偏差を何倍とってもゼロにならないのと似ており、数学的なゼロと現実的あるいは事実上のゼロの間に違いがあることを示している。従って一つの事故の発生確率がある確率値以下になるとその事故は事実上起こらないとするものである。これは技術に対してある程度の信頼を置き、更に間接的とはいえ、原子力の安全の実績が認められていることが必要である。

原子力安全と社会受容性

原子力の安全論議においてリスク概念の理解が確率と結果のそれぞれについて行われず、その積のみについて行われる時代が来れば、等リスクの要求はあるいは他の科学技術や自然現象のリスクと同じレベルまで社会の容認するところとなるかもしれない。事実、科学技術が巨大化していく中でそれの持つ潜在的危険性は大きくなってきているが、発生確率はそれの発生を事実上無視できるほど小さいことが要求される。大型旅客機の墜落事故の発生確率と、死亡者

の関係はこの条件を満足しているかどうかは議論の余地があるが、現実には航空機による大量輸送は現代社会では不可欠になっている。一事故当たりの上限がはっきりしているからかもしれない。

リスク概念は生命保険や地震保険の評価等、特別の場合を除いて一般の産業や自然災害に対して人々の日常の価値判断の中に入り込んでいるとは思われない。今後時代の進展につれて、人々がリスクを日常的に認知し、その大小だけで行動や選択の価値判断の基準とするとは考えにくい。社会の価値基準や利害は複雑に入り組んでおり、単純に割り切ることは難しいと思われる。

原子力についてはそれ自体航空機や自動車のように日常性がなく利害関係もそれほど明確になっていない。従ってリスク論だけですべてを評価することにはならないだろう。事故の大きさ、すなわち被害に上限がないと社会には認められにくいし、また、影響の及ぶ範囲も限界がなければならないとする考え方がある。たとえ確率が小さいとはいえ、科学技術の持つ潜在的危険性がすべて顕在化するようなことでは健全な社会が容認することはなかろう。従ってリスク論をベースとした等リスクの考え方は事故の大きさのある範囲に限って適用し、その範囲で原子力システムの設計を総合的にバランスのとれたものにする手法として活用するのであれば十分有効である。リスク論を中心とした原子力の安全自体もこの範囲で考えることで十分目的が達成されることになろう。現在の軽水炉の安全はすでにこのレベルまで達しているが、より小さ

な確率の範囲まで入り込んでの研究が更なるリスク低減化の観点から行われている。事実、現在の原子力安全研究の焦点はここに置かれ、苛酷事象の内容の解明に向けての研究が進められ運転や設計へのフィードバックを考えている。安全確保のための各機能は工学的設備を外部から付加することによっても発揮できるが、原子炉の固有の性質によって確保することもできる。このような合理的かつ本質的安全論理を具体化し、社会受容性を得るためには大事故の発生それ自体を固有の性質を中心に防止することが何にも増して重要になる。

このため科学技術がその固有の性質として備えているものの組み合わせでシステム内で発生が予想される事象に上限を与えようとする考え方がある。これは潜在的危険性とは言わないまでも極限的事象に対しては原子炉の固有の耐性でこれを防止し、抑制しようとするもので、合理的安全確保方策の構成に貢献している。事故の被害の上限の存在および上限の大きさについて論ずるには、この方法すなわち物理現象を中心に話した方が分かり易く説得力があろう。

事故の上限と臨界問題

原子力施設の代表である原子力発電では原子炉の中で核分裂反応が起こり、その結果炉の中で熱が発生するという基本現象に対して、異常が発生した場合に固有の性質に基づく機能がどのように作用するか、から安全の議論は始まる。

固有の性質によって達成される機能は工学的手段によるものと違って失敗の可能性がない。

この性質によって達成されるべき最も重要なものは、核分裂の連鎖反応に直接関連した安全問題を排除することである。言い方を変えれば核暴走に至るような事故を本質的に排除することである。これはすでに述べた「自ら整合性ある原子力システム」の安全確保に求められる整合性の第四要件にほかならない。

核分裂の連鎖反応に直接関連する安全問題を理論的に設計から排除することができれば原子力の安全はどのようにでも確保できるとさえ言える。これはチェルノブイリ事故のように止めることに失敗するような原子炉をつくらないことである。これが実現できると残された原子力の安全は、事故に際していかに原子炉を冷却するかにある。原子炉の持つ熱エネルギーや放射性物質が放射線を出して他の元素に変わっていく際に発生する崩壊熱を取り除いてやれば原子炉は冷え、原子炉に蓄積された放射性物質の放出が防止される。少なくとも現在の軽水炉は熟成された技術であり、核暴走の心配はなく、冷却も冷却材喪失事故の際の原子炉の冷却に関する論争すなわちＬＯＣＡ－ＥＣＣＳ論争に決着が付けられ、十分冷却ができるものと考えられている。

より小さな確率の世界での苛酷事故の研究が進められているが、これは冷却が行われない場合を想定している。もちろん、冷却が阻害されると仮定すると極端な場合原子炉内の圧力上昇や熱による燃料や構造材の溶融や破損が結果的には想定される。また、化学反応によって水素

のような可燃性物質が生まれることがあり、これらの急激な燃焼によって圧力上昇が予想される。この場合でも水蒸気爆発、水素燃焼等について現象論を解明し、十分抑制した形で安全確保へのフィードバックを行うことが可能になってきている。

ドイツはフランスと共同して次世代軽水炉として、これまでの安全研究の成果を総合的に取り入れた、ヨーロッパ型加圧水型炉（ＥＰＲ）の開発を続けている。ここでは苛酷事故を抑え込むためのコア・キャッチャーの設置をはじめ、安全上の配慮を行って、敷地境界を越えて放射性物質の影響が及ばないとの、ゼロ・エフェクトの考え方を前面に出して、ドイツで二一世紀に再び増設が必要となるであろう原子力発電に備えている。

このような安全研究の成果から、ある事故結果を合理的と考えられる物理的上限と証明することができれば、限界事故としてこれ以上のものは想定しなくて良いことになり、安全論理が完結できることになる。このような物理現象に基づいた決定論的上限が設定できれば、確率が小さくてもそれが明日起こるかもしれないという不安に対しても十分答えることができる。現在の安全研究は従来の知見獲得のためのものから、設計へのフィードバックを目指した戦略的なものへと移りつつあり、自ら事故の上限を明確にできるものとなろう。

受動的安全炉の概念

単純な安全論理

軽水炉はこれまでの多面的な研究開発と運転実績を設計・運転に反映することによって改善を重ね、すでに現在その技術は十分に熟成したと言えよう。しかし、一方、見方を変えればこれまでの大型化路線の中で大型軽水炉は複雑化、高性能化してきたため、一般的に言って分かりにくく、その安全性について簡単に説明することが難しい。

単純な安全論理で説明することが将来の原子力に不可欠だとする立場に立てば、安全を中心に性能上最高レベルにまで達しないとしても分かり易いシンプルな設計、単純な運転を念頭においた軽水炉を開発しようとする考え方が生まれたとしても不思議ではない。それほど原子力にとって社会受容性は重要だからである。このような研究開発の姿勢を総括した形でその安全性を示すとすれば、むしろシステムの長所を追求するよりも安全上の特性を積極的に発揮させることが求められる。

思考の出発点は原子炉の中で起こる、あるいは起こることが予想される物理現象のタイム・コンスタント、すなわち時定数に着目することである。これらの現象の時定数がどの程度かは原子炉の安全論理を構築する上で重要な指標となる。基本的には一〇〇万分の一秒といった非常に速い現象には工学的制御系は追いつかないことが考えられ、また非常にゆるやかな現象の

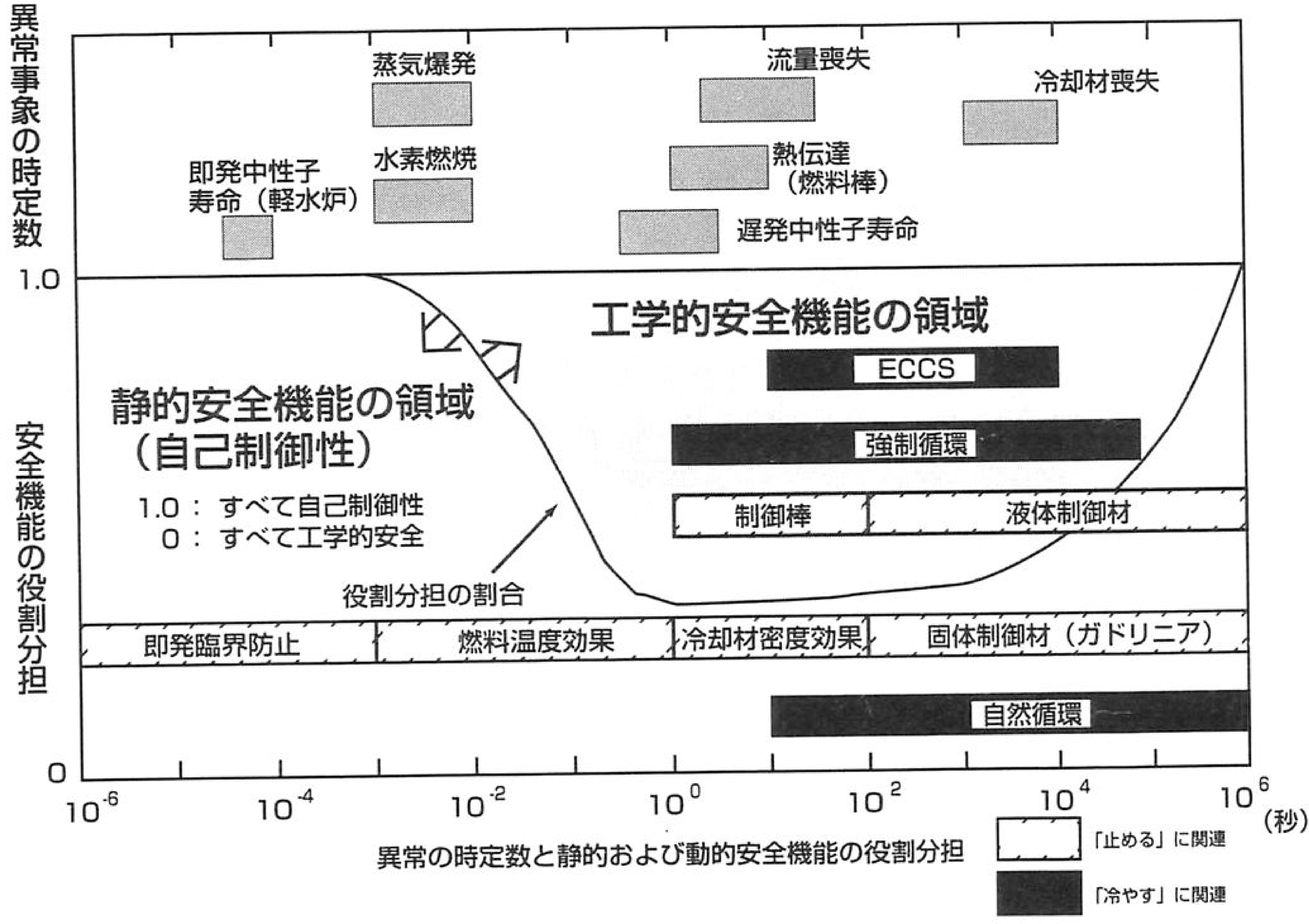


図24　タイムコンスタント

制御を工学的制御系に頼ることは信頼性の面からは得策とは言えない。この両極にある現象は自然法則に基づいた原子炉固有の安全特性でカバーし、時間的にその中間にある現象に対して工学的あるいは人為的な制御を加え、より性能を高めようとするのが素直な考え方である。これは、すなわち合理的安全論理の基本的考え方を原子力システムの設計に応用したものと言える。

速い現象の多くは、核分裂の連鎖反応に直接関連したものであり、遅い現象は原子炉出力の除去、すなわち冷却に関連したものでありその中でも崩壊熱の除去に関したものである。これまでの安全研究の成果や運転経験から時定数を中心に見た現象は図24のようになると考えてよい。

自然法則と工学的安全の役割分担

この安全の基本的考え方を原子炉の設計にどのように組み込んでいくかについては二つの考え方がある。その一つは自然法則に基づいた固有の安全性をほぼ完全に生かして、その安全上の特性を中心に原子炉を設計し運転しようとするもので、受動的安全炉（注Ⅲ-17）という名前で呼ばれている。この安全の考え方を取り入れた最初の原子炉がスウェーデンから提案された軽水炉ＰＩＵＳ（注Ⅲ-18）で、その後軽水炉に限らずいくつかの原子炉、例えば液体金属冷却高速炉（ＡＬＭＲ）等について受動的安全のアイデアが提案されており、出力および出力密度の大

きくない小型炉でこのような考え方が実施され易いことが分かっている。この際規模や性能を多少犠牲にすることを考えておかなければならない。

一方、この考え方に沿って出力規模は少々下げても現在の大型炉の持つ複雑さを改善し、設備、運転の両面から単純さを積極的に導入しようとするのが単純化軽水炉と呼ばれるものである。目下、概念設計が行われているものではＡＰ―600やＳＢＷＲ等がその代表的なものであるが、いずれも電気出力六〇万キロワット級でＡＰＷＲやＡＢＷＲの半分以下の出力にし、単純な安全論理を精一杯発揮した設計で中規模の発電用原子炉を開発してきているが、まだ具体的な建設予定はない。しかし、世界的にはアメリカをはじめ、次世代の軽水炉開発の一環として研究開発が進められている。日本も原子力開発利用長期計画の中で研究すべき対象としている。

受動的安全炉と呼ばれる小型炉だけが、技術的な意味で特に際立って高度の安全性が確保されるとは必ずしも考えているわけではない。むしろ日本のような技術先進国にとってはこれまでの安全上の実績を見れば、技術に対して一定の信頼を置くことは可能であり、大型炉においても小型炉と同等の安全を確保できると考えられる。

しかし、小型炉で採用されたシンプルな安全論理を現在の大型炉にそのまま適用することはできない。というより現在の大型炉の安全論理は固有の安全より工学的安全にベースを置いて展開されてきている。従って、工学的安全系統の故障や誤動作を前提として安全を考えていく必要があった。このため単一目的のために多数の同様の安全系統を準備して決定論的安全の考

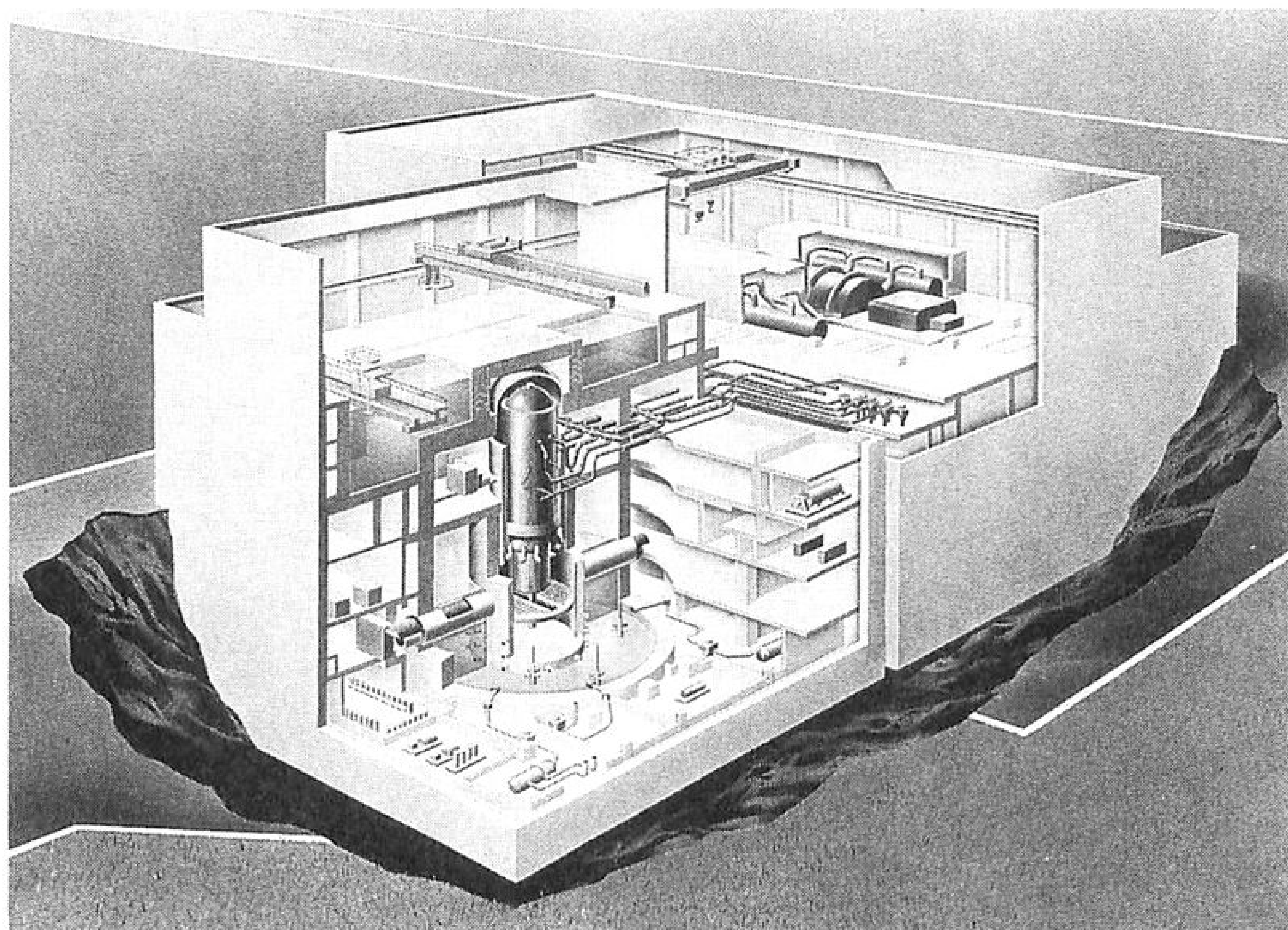


写真7　ABWRの完成予想図

え方を確立したり、確率論にベースを置いた安全の考え方を必要とすることとなった。このため機械や設備の故障についていつも可能性ありとするリスクの考え方から解放されない弱点が出てきている。しかし、スリーマイルの事故は設計安全に加えて運転安全の重要なことを教え、この反省に立って大型炉にあっても固有の安全が本質的に設計によっては取り込まれていることに着目し、これを積極的に評価する方向になってきている。

新型軽水炉であり、事実上近い将来日本の軽水炉の主流となると考えられるABWR（写真7）やAPWRはこれまでの大型軽水炉の流れの延長上にあり、日本が進めてきた軽水炉の改良標準化の成果の一つである。従って、必ずしも単純

化の考え方を最優先課題とはしていないが、このような安全上の配慮が十分払われたものになっており、例えばＡＢＷＲは冷却材喪失事故によっても炉心は常に水で満たされるよう設計されている。

受動的安全炉のような設計思想は従来のような大型炉を中心としたものと別種の安全論理を構築することができるし、原子力の安全をシンプルな論理で説明することができる。

更に、このような自然法則に基づいた特性を持つ小型炉は現象自体がゆったりした余裕のあるものにでき、保守点検についても高度のものを要求しないものにできる。これは原子炉の無人運転を可能にし、時々の巡回点検で十分安全管理ができるものとなる可能性を持っている。受動的安全炉の安全上の特徴を端的に表現すれば核分裂の連鎖反応に直接関連した事象が急峻なものでなく、かつ、原子炉自体の持つ固有の特性で異常が拡大することなく抑え込まれることと、原子炉の異常な状態に対しても崩壊熱の除去が自然法則によって可能になることで、原子炉安全の基本である「止める」「冷やす」が基本的に達成できるところに安全論理の単純さがある。このような安全上の特徴および運転管理上の特徴を持った原子炉は、開発途上で未だ原子力技術を十分持っていない国々のエネルギー供給に好適であろう。また、極地や避地で人口も少なく自然条件にも恵まれていない地域のエネルギー源としても好適と考えられる。

また、原子力の都市接近は、原子力文明構築の上でいつか解決が求められる課題であると考

えられる。大型炉でいまの安全論理をそのまま適用すれば広い敷地を必要とすることになり、東京のような地価の高いところではとても支払い可能な電気料金にはならない。むしろ、そのような都市接近を可能にするのはこのような決定論に従った安全論理が展開できるシステムとなろう。

6 原子力と地球環境

トリレンマと原子力

自然との共存

地球には砂漠が多い。まったく荒涼とした土の塊の平原が続いているのを見ると、異様な感じに襲われる。しかし、その中に洪水注意の標識を見るともっとびっくりする。砂漠は雨が降らないから砂漠なのではなく、雨が降っても植物がないから水の吸収能力がないためらしい。砂漠をかかえる国々にとって砂漠の緑化は大きな課題である。砂漠研究所を持つ大学もある。

シナイ半島の広大な荒野は驚くほかないが、イスラエルではテルアビブ周辺でも赤土に植えられた植物に散水している様子が見られる。ブラジルにも似た光景が見られた。旧ソ連の核実験場として数百回の地上、地下での核爆発を経験したカザフスタン共和国のセミパラチンスク21に近いポリゴンも、砂漠とは言えないまでも荒野が周囲に際限もなく広がり、地平線が三六〇度、どの方向にも見える（写真8）。また、動乱や内戦が伝えられたエチオピアやソマリアあるいはアフガニスタンにしても、テレビ画面は緑の必要性を映し出していた。日本のように



写真8　カザフスタン共和国、原爆実験の跡地

国土開発が進み、文明が進展した国においては、自然はその状態を守るものであり、環境は保全する対象と考えられているが、世界には自然環境の改善を必要とする地域は多い。また、北極に近い地域、シベリア等も改善を必要とし、自然の環境の中だけで生活するには適していない。このような環境の改善に必要なのは当然のことながら、エネルギーと真水である。水はエネルギーがあれば、汚水からでも海水からでもつくることができる。

人類文明の進展に伴って、地球人口は増大し、エネルギー需要が飛躍的に増加することとなった。この結果、当然のことながら地球は狭くなり、その有限性についての議論は深刻になっている。しか

し、飛行機から見る地球は海が広がり、山が連なり、森林が続く。地上で車から見る世界はもう少し局地的で砂漠が続いたり、地平線が見える一方で大都会では住宅が密集して山の中腹まで続いている光景に出会うこともある。

人類は局地的には自然との共存を考え、自然の改善や保全を図ってきた。人類は文明の進展とともに自然の剝奪から保全の方向に理念を転換し、農水産業等において食料、原材料等を自然との棲み分けの中で確保しようとしてきた。しかし、大きな目で見れば地球環境全体に対しては配慮が十分ではなく、というよりは大気、海洋、陸全体にわたってのエネルギーや物質の流れについての知見に乏しく、地球環境についての理解が十分でなかったと言えよう。自然は複雑で、気象変動の原因も十分解明されておらず、地球環境との調和を図るに先立って今後の研究に期待するところが多い。また、人類文明が地球環境に与える影響についても決して十分解明されているとは言い難い。航空機が発達したからといって、地球全体を見たり、世界各地の風土的、気象的特徴を体験し、認識することにはならない。地球環境の問題はこのような特殊性を持ったものとしても存在する。従って何が共通課題で、何が特殊な地域的課題なのかを冷静に判断しないと場合によってはムードに流れすぎることにもなる。

トリレンマー全地球的課題と地域的課題

二一世紀へ向う中で、世界はトリレンマの状況にあると言われる。エネルギーや物質の大量

使用に由来する問題であるが、その定義には二通りあるように思える。すなわち、トリレンマの中味としてエネルギー・環境は共通しているものの、あとの一つを人口とする場合と経済とする場合とがある。正確な定義の違いがあるかどうかは定かではないが、人口をその中に含める場合はトリレンマをグローバルな全地球的課題として捉える側面が強く、後者にはニュアンスとして先進国と開発途上国との関係、特にエネルギーと物質の、すなわち原材料の調達に関して生じてきたような課題を同時に捉えようとする視点があるように見える。

人口・エネルギー・環境のトリレンマに苦しむことを前提に二一世紀を考えることは、必ずしも妥当ではなく、現在の世界の政治・経済・社会の状況認識の中に解決策を見出す努力をする必要がある。一つの視点は地球全体にまたがる問題、すなわち地域や社会の特殊性を必ずしも前提にしないで済む問題、例えば炭酸ガス問題、オゾン層破壊問題等である。

次は世界の多くの地域に現存している環境問題である。地域性や特殊性があり、先進国、後進国がそれぞれ独自に解決すべき問題であり、同時に先進国と開発途上国が協力して解決すべき問題等である。

トリレンマ解決への正論が人口増大の抑制、資源消費の抑制および省エネルギー技術の確立であることは言うまでもない。これが解決できれば恐らく環境と人類社会の調和が保たれることになるだろう。しかし、現実にはその通りにはならない。遠い将来はともかく、近未来については人口の増加もエネルギー消費の拡大も、そしてその結果として環境へ負担がかかること

も想定しておく必要がある。事実、先進諸国では人口の増加は鈍化傾向にあり、日本でもここ当分一億二〇〇〇万台の総人口のまま、時代が経過していくだろう。しかし世界全体で見れば毎年一億人を越す人口増加が続いているという事実があり、二一世紀中頃の地球人口一〇〇億人突破はこのままでは避けられないような状況にある。地球人口がどれくらいで平衡に達するのか、また、その制約は何によるものなのかは必ずしも明確にされていないが、もちろん、無限大というわけにはいかないので、どこかで飽和することになろう。

一方、エネルギーや物質の消費に関しては当然のことながらその利用形態に変化が見られているが、未だ必ずしも日本を含む先進国でも完全に鈍化段階に入ったとは考えられず先行き増加傾向が続くと見る方が無難であろうし、特に開発途上国のエネルギー需要は大幅な伸びをするものと考えておく必要がある。エネルギーの需給関係は人口増のような固定的因子のほかに経済の動向のように変動的、流動的因子に影響されることが多く、なかなか明確な形で将来の量的予測をすることは難しい。このことはすでに原子力の世界でも特に原子力発電量の将来予測に関して経験してきたことでもある。

環境問題についても、現在の社会の理解は現代人の物質文明に裏打ちされた生活が、自然環境に与えたマイナス影響をどう改善しながら自然環境の保全を図っていくかということではないかと思われる。マイナス影響の全地球的部分と地域依存的部分のそれぞれに対して問題を提

起し、解決、改善を考えていこうとしているように思える。確かにこの理解と問題の受け止め方はかなり積極的でもあろう。これは経済的因子をトリレンマの中でも重視する場合により妥当とも言えるだろう。環境問題は日本でも一般社会のよく理解するところとなり関心も深いが、環境問題に対する対応は現在の環境問題の内容に対する正確な理解と予防的性格を持つ事柄に対する冷静な判断が必要であることは言うまでもなく、環境問題に対する人々の関心を一過性のものにしないことが望まれる。

エネルギーや資源の確保と消費の形態についても当然予測しておく必要があろう。これは、人類はこれまで陸上あるいは地下に資源を求めてきたが、今後は海洋、海底に鉱物資源、エネルギー資源を求めるだろうことは容易に理解できることであるし、更に将来は太陽系の惑星から宇宙の星に科学の目を伸ばし、宇宙空間にこれらを求めることがあることも想定しておくのも無意味ではなかろう。

二一世紀のエネルギー

高齢社会と科学技術

人類社会は、長寿命化によって先進国を中心に高齢社会へ向けて変化していき、この社会を

支えるには科学技術に期待するところが多いことは言うまでもない。また、便利さ、使い易さと省エネルギーとの関連にも目を向けておく必要があろう。この半世紀の間に日常生活における科学技術は大きく発展し、生活パターンに変化を与えてきたことは誰しも認めるにやぶさかではないが、目的の追求に逸ったためにその過程で提起された問題への対応が十分でなく、負担を後に残すことになったことは、公害問題を例にあげれば容易に理解できよう。テーゼの実践に急ぐあまりアンチテーゼへの対応を見過ごしていたことである。科学技術開発や社会の指導理念の中にアンチテーゼへの対応が遅れがちになりやすい性質があることを十分認識しておく必要があろう。気が付かなくて対応が遅れたこと、気付いていたけれども問題が現実になってから対応が始まったこと等、いくつかの例が見られる。

しかし、ジェームス・ワットが蒸気機関を発明し、エネルギーを動力源に使い始めたことが現代の炭酸ガス問題の始まりというのはあまりにも因果関係に距離がありすぎる。従って、問題の原点をここまでさかのぼって求めることはできない。蒸気機関の存在は認めておいて炭酸ガス問題に対処することが必要である。一方で炭酸ガス問題の地球温暖化との因果関係が未だ明確でないということで、化石燃料の大量使用に問題なしとする姿勢は必ずしも正当ではないと言えよう。当然のことながら因果関係の解明に努力を払うとともにその大量使用に抑制的姿勢が必要になろう。なぜなら地球が現在保持する炭化水素を全部燃焼させれば大気は炭酸ガスで充満され、生態系は存在しなくなることは自明の理だからである。

石油、石炭から天然ガスへのエネルギー源の転換などはそれ自体同じ使用量を前提とした議論の中で、より炭酸ガス発生量の少ない資源への転換を図るものであろうが、その備蓄性、輸送性を考えると、天然ガスが石油代替として環境問題を積極的に解決する方向にあるとは簡単に言えるものではなかろう。

電気エネルギーへの期待

二一世紀社会の形態を予見することはそれほど易しくもなく、また単純なものでもなかろう。しかし、先進国と開発途上国の間に経済、技術の上での格差が減少すると考えることは長期的には妥当であろうし、さもないとアンバランスが拡大し、収拾不能に陥ることになろう。人口も開発途上国では現在より以上の増加が見込まれ、先進国は高齢化、言い換えれば長寿命のための人口増はあっても出産による人口増はそれほど期待できず、平衡状態にかなり早く近づくと期待される。あるいは一時期減少段階に入ることとすら想定される。この結果、開発途上国でのエネルギー需要は拡大し、先進国ではエネルギー消費の質が変化するものと考えられる。それに随伴して、途上国中心にアフリカ、アジア、南米での開発が進められ、寒冷地の開発、砂漠の緑化、森林の保護等のためのエネルギー供給が行われよう。また、高齢社会、言い換えれば高度に熟成した社会においてエネルギーをどう供給していくかが重要で、エネルギーの質の改善を伴う。高品質、高互換性、高信頼性のあるエネルギーとしては当然電気エネルギーがそ

の最右翼であろう。

事実、日本でのエネルギー供給に占める電気エネルギーの割合は現在で約三分の一であり、二一世紀前半には二分の一に達すると考えられている。このような要求を満足するためには発電はやはり大規模なものにも期待せざるを得ないことになる。各家庭で太陽光を集めて発電することでその総需要をまかなうことができないのは当然である。

高度に文明の発達した、技術の裾野の広い先進国においては化石エネルギーのように資源制約の強いエネルギー源に期待するだけでなく、むしろ技術制約型のエネルギー源が当然その対象になってこよう。原子力は、正に技術エネルギーの代表であろう。大型原子力発電の集中立地については社会的にも大きな論議を呼んでいるところでもあり、また地域との融合の観点からは問題が残されるところであるが、安全の観点から言えばこれまでの安全の実績の上に立って、冷静に考えれば社会的にも解決策が存在することであろう。更に加えて日本のように無人島も多い国では、立地の考え方も地下発電方式あるいは小規模多数基立地なども含めて論議することは可能である。

発電以外の用途を考えると、現在の日本での産業利用でのエネルギー消費量の単位はそれほど大きくなく、小型原子炉で十分対応できるものであろう。その代表的なものとして熱供給、推進力供給、中性子やガンマ線の供給等々原子炉の用途は多彩であり、それぞれの目的に応じた小型、高性能、高稼働率原子力システムが考えられる。

先進国でこのような形での原子力利用へ向けての提言は以前から行われてきているが、残念ながら社会は未だこれを十分受容する段階には至っていない。

このような形の原子炉は砂漠の緑化、離島での電源、極地における熱源、電源、更には海洋開発、宇宙開発の分野でまず試験的規模で使うことが有効なのかもしれない。小型原子炉は十分無人運転に耐えることができると共に、酸素を必要としないという優れた特徴を持っている。

原子力の環境適合性

放射能による環境汚染とは

原子力は環境に優しいエネルギー源である。二一世紀社会のトリレンマを解決できるのは化石燃料ではなく、原子力であると言って賛成するのは余程の原子力の知識のある人か、二一世紀における石油文明の限界がよく見えており、何か他のものに石油代替を求めようとしている人々であろう。

現在、一般的には原子力は地球環境にマイナスの影響を与えるものとして社会が認識しているように思える。広島、長崎に原爆が投下された時、人々はこの土地には将来にわたって草木が育たないと怖れたし、原水爆の地上実験で空中に吹き上げられた放射性物質は長い期間論議

の対象となっていた。中国の核実験があった時など日本の原子力施設の放射線測定器がこれを検出し、警報を鳴らすこともあった。原子力施設の中の方が、管理されているお陰で外に居るより放射能レベルが低いという何とも言いようのないパラドックスを経験した。また、スリーマイルやチェルノブイリ等平和目的に建設運転される原子炉も、炉心を溶かすような事故が発生し、事実チェルノブイリでは事故とともに発生した火災によって放射性物質が空中に吹き上げられ、遠く離れたヨーロッパにも放射性物質の降下が見られたほか、季節風に乗って日本でも微量ながら放射性物質が観測された。

一方、原子力発電の運転によって処理される放射性廃棄物の存在が、将来環境汚染につながるかもしれないと心配する人々がいる。長い半減期の放射性物質の扱いについて消極的意見を持つ人々がこれに当たる。このようなことが放射能に対する嫌悪感と合体すると原子力は地球環境保全と相容れないものとするムードが醸成されるのもやむを得ないことである。

原子力と自然環境との調和を図るにあたって考慮すべき点は、自然環境の側からは環境保全と環境改善の双方がある。前者は、石油文明を維持発展させるためにエネルギー資源をはじめ原料の大量調達の結果生じた森林の後退等の環境破壊であり、また大量消費の結果排出された物質に由来する大気汚染や水質汚染に代表される環境の悪化がある。

一方、地球上には未だ人間の生存や社会構築に不便や困難を伴う地域がある。極地や砂漠が

これに当たる。このような自然環境を改善していくことも必要であろう。環境は先進国から見て保全するだけでなく、極地開発、砂漠緑化等自然の改善の側面もあることを認識しておく必要がある。

一方、原子力の側からも考慮すべき側面がある。すなわち、原子力自らが自然の保全にマイナスを与えないかで、原材料の調達に伴うもの、例えばウランの採掘の環境問題や利用後の排出側での問題をエネルギーと物質の側面から見ておくことである。

エネルギーについてはいかに有効利用を図るかにかかっている。地球上ではエネルギーを一〇〇％有効に使うことはできず、例えば熱から電気への変換効率すなわち発電効率は四〇％内外で、多くのエネルギーを環境へ排出している。これは原子力に限ったものでなく、エネルギーシステムの共通課題と言える。物質の廃棄について言えば、石油文明下では例えば炭酸ガスは、一〇〇％放出が前提になっており、現在の地球温暖化問題のキーとなる物質とも言われている。一方、原子力は放射性物質を環境から隔離する無放出すなわちゼロ・リリースを原則としており、実際にもチェルノブイリ事故が放射性物質の隔離に失敗しているが他の場合についてはいずれもゼロ・エフェクトに事実上成功している。これは排出物の量が少ない所に技術的可能性と実現性があることを意味している。原子力が人類文明を支える総合科学技術として発展した段階では、原子力発電に関連した放射性物質のゼロ・リリースにとどまらず原子力全体についての環境適合性が要求されることになる。正に原子力システムの整合性が要求されるこ

とになろう。
原子力システムの整合性は、将来の原子力文明の構築にとって不可欠の要素と考えられ、今後の研究開発の重要な方向となろう。

自然環境の保全と改善

一方、原子力によって環境破壊を防止し得るのか、あるいは環境を改善できるのかについては原子力の固有の性質であるエネルギー、物質転換、放射線を積極的に応用していくことであり、すでに研究開発が始まっている。原子力の地球規模での環境への貢献は、エネルギー開発を通じてエネルギーの南北問題の解決、砂漠の緑化、極地環境の改善、海洋・宇宙開発等があるほか、化石燃料と置換することによる炭酸ガス問題の解決の他にも熱や放射線によって環境汚染物質の転換、無害化等があり、今後の研究開発が期待される。（図25）

「自ら整合性ある原子力システム」は、人類社会にエネルギーを供給する一方で、明らかに地球環境との調和を図ることをその大目的に揚げており、その究極的目標とその前段の目標あるいは現実的目標を明確にしておく必要がある。エネルギーの異常発生を防止し、事故による放射性物質の放出を抑制し、敷地境界を超えて影響が及ばないようにすることは、「自ら整合性ある原子力システム」の中の安全確保の目標であり、チェルノブイリ事故のようなことは根本的に排除しようとするもので、臨界安全からの解放と呼んでいるものである。

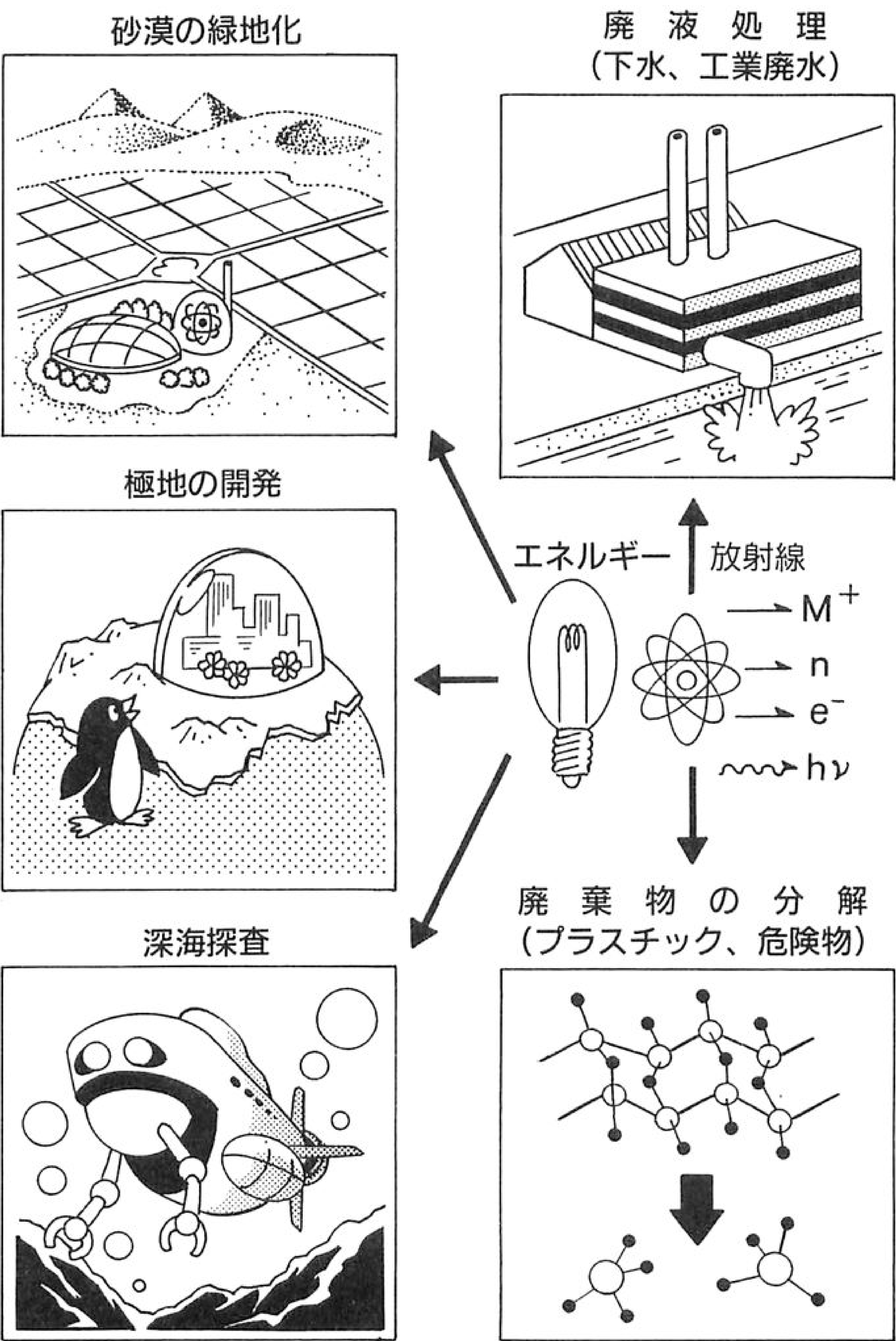


図25　自然環境の改善と保護

放射性廃棄物については放射性物質の消滅に関するもので、その究極的目標は当然のことながら放射性物質を原子炉の中で非放射能化することによって自然環境に負担を残さないことであるが、少なくとも最低の目標は、自然にある放射性物質、この場合はウラン鉱の持つ放射能量であるが、これを原子力システムに取り込み、核分裂や燃料生産に使った後生じる放射能量の方が低くなるようにすることである。このことは、原子力システムの中で自然の放射性物質の量が結果として減少させることができることを実証する第一歩である。高レベル廃棄物の地層処分によって地球上の放射性物質の量が飛躍的に増加するとする誤解を解くことにつながる。更に「自ら整合性ある原子力システム」の技術開発の成果は一面において、この環境保全の目標がどれだけ達成されたかによっても評価される。

さて、原子力によって期待される環境保全とは何であるか。この近未来的目標の一つは石油文明のもたらした環境汚染を低減または解消することにある。

原子力の一つの特徴であるガンマ線、荷電粒子、中性子は高分子や結晶等の構造を切断し、より単純な化学形態に分解することができる。この性質を利用して汚染物質の無害化が期待される。煤煙の放射線による浄化（注III-19）はその応用例の一つとしてすでに成果のあがっている分野である。大気汚染に限らず水質汚染に対しても応用可能であり、浄水場に利用することも当然考えてよい。

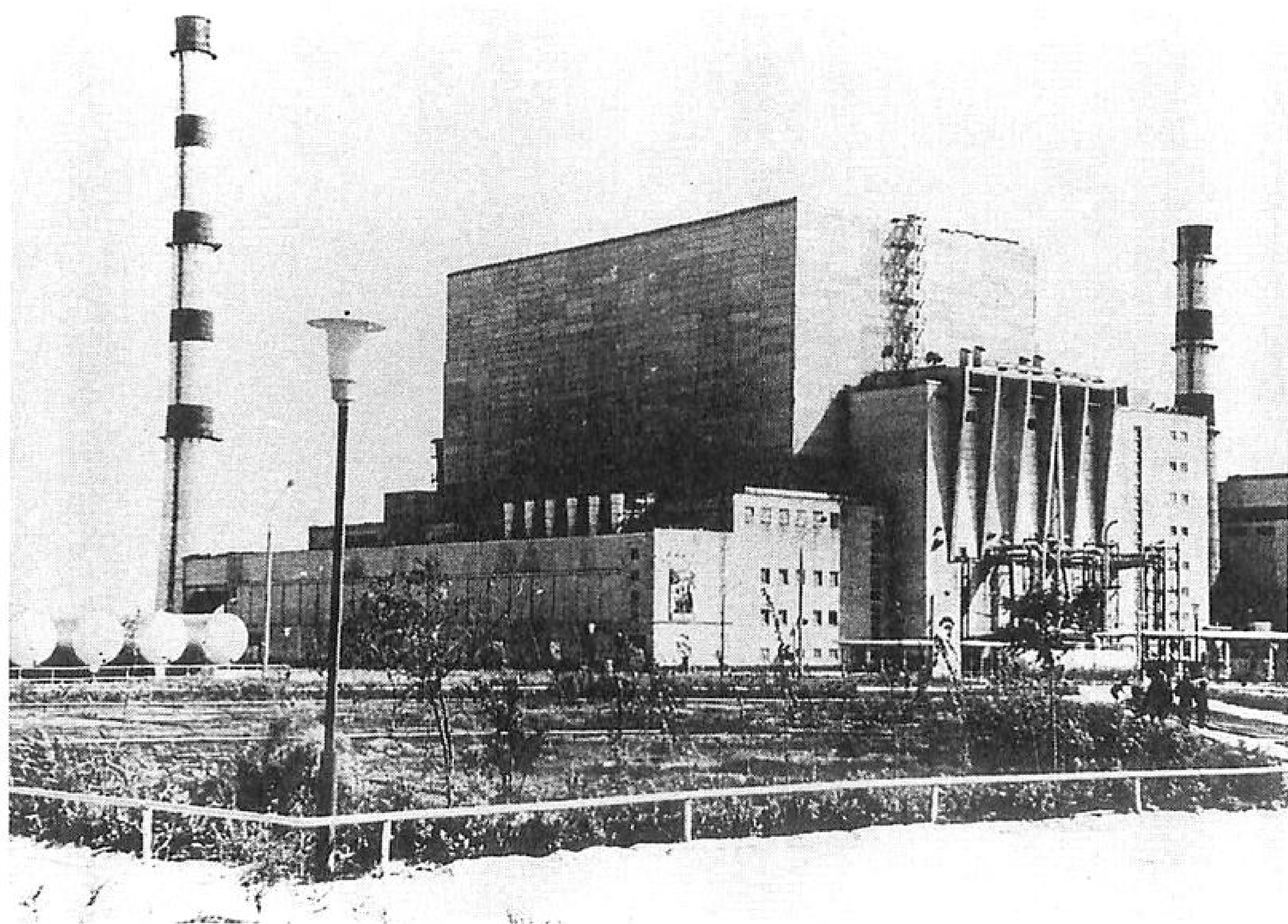


写真9　高速炉「BN—350」

更に環境保全からは少し離れるが、日本をはじめ先進国では自然の物質循環に頼ってきた供給形態を維持することが難しくなってきている。その代表的なものが上水道である。水の供給は原子力による熱や放射線の利用として単純ですぐにでも応用可能であろう。事実、日本の原子力発電所では河川からの真水の供給が不十分な場合、原子炉の熱で海水を脱塩して真水を得ている(注III-20)。また、カスピ海に面したカザフスタン共和国のアクタウ市ではここ二〇年ばかりBN—350(写真9)という高速炉によって海水から真水をつくり、市の上水道に利用してきており、一つの原子炉で電気と水の供給を同時に行っている。

このように原子力は、地球環境および

人類社会と調和を保ちながら二一世紀の人類文明に貢献できる十分な可能性を持っている。その研究開発は拙速に流れることなく常に長期展望を掲げ、近未来の目標を明確に定めて着実に進めていくことが望まれる。

第四章

地方が原子力を見る時代

７　日本の原子力開発

日本の原子力開発の特徴

原子力を捉える目

原子力発電の順調な開発は、日本国民の資源小国に対する認識とエネルギー源開発の重要性への理解とがその背景にあって、これを支えたことは疑いない事実である。

しかし、現在先進国になり、高度経済社会になった日本で、原子力開発が国民に分かり易く説明され、理解を得ながら進められているかと考えると、必ずしも十分とはいえず、所々に矛盾と破綻を来していると考えられる。

原子力は、その効率を重視した開発過程で多くの分野に細分化され、それぞれに専門家集団を形成してきた。多様に専門化された分野で、相互に情報を伝達し相互に理解し合うことは決して容易ではない。特に多くの専門用語、略号による情報伝達では、社会で市民権を得るにはほど遠い。この弊害は原子力分野にも見られ、情報量の多さは逆に大枠での相互理解や合意を得る上で邪魔になっている場合すら見られる。

しかし、核分裂炉は原理的にそれほど難しいものではなく、フェルミはおそらくその卓越した頭脳と計算尺レベルのもので原子炉をつくり上げたはずである。いまシカゴにはシカゴ・パイル1号（CP―1）は残っていないが、CP―1に数年遅れて一九四六年に独自につくられたロシアのクルチャトフ研究所の原子炉（写真10）は現在も稼働中で、当時原子炉の建設に参画した老人が説明役をつとめている。計画の当初は欧米から情報が入っていたが、途中から入ら

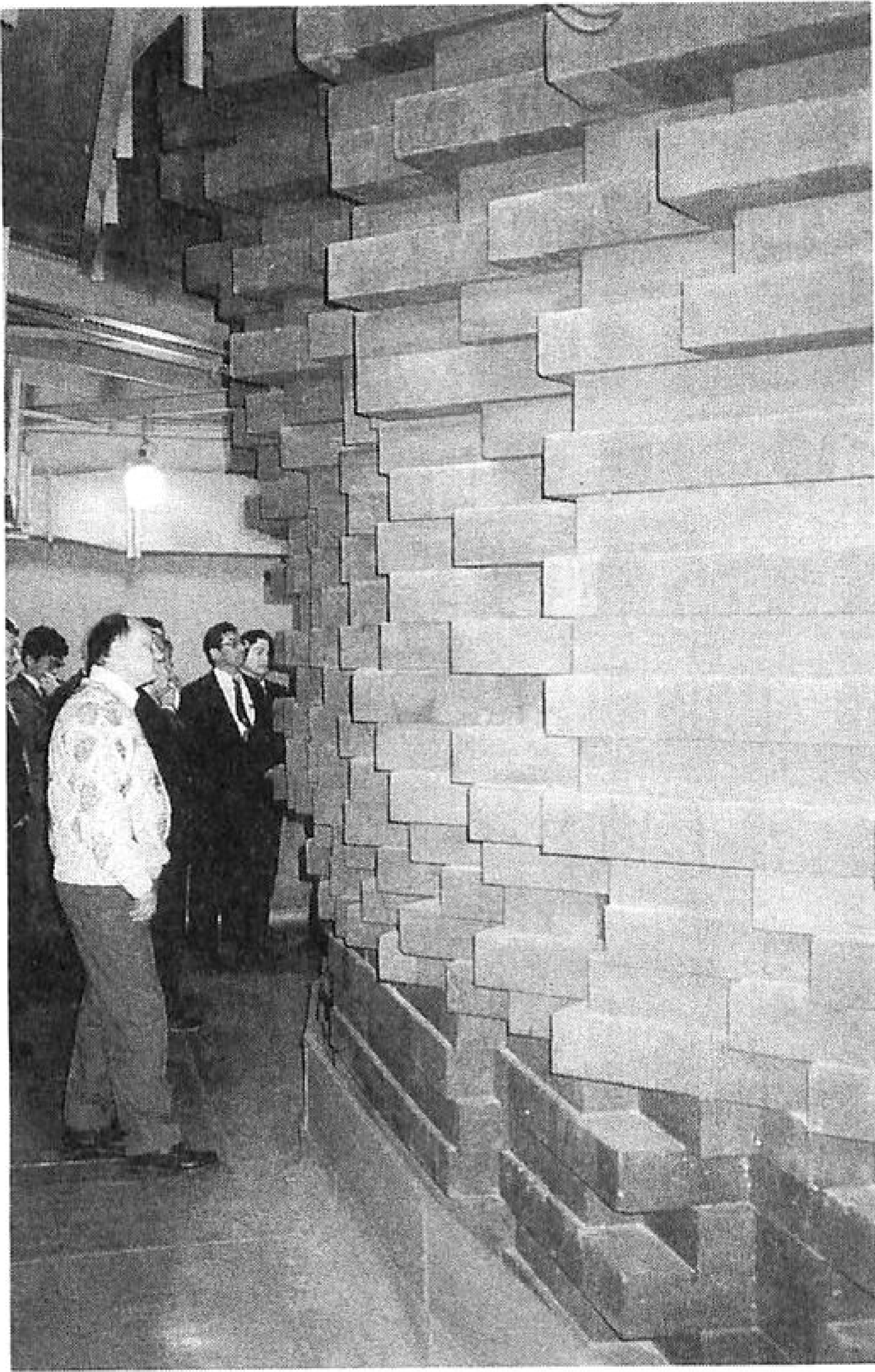


写真10　クルチャトフ研究所の原子炉

なくなり、苦労の中で問題を克服し建設したという。アメリカとロシアで独立に建設できたこと自体、原子炉の原理が決して手の出ないほど難しくないことを意味しているようである。クルチャトフ（注Ⅳ-1）は初期のソ連の原子炉開発のリーダーでクルチャトフ研究所の所名にもなっているし、カザフスタンの原爆実験の地セミパラチンスク21（注Ⅳ-2）のことも現地ではクルチャトフ市と呼ぶ。旧社会主義国家というか、ロシアには多くの場所に、このような国家に貢献した人達の銅像や名をとった町や通りがある。レーニンなどその代表である。

クルチャトフ研究所のこの原子炉を見ると、原子炉のことをパイルと呼んだ理由がよく理解できると同時に原子力をあまり複雑化せず、サイエンスの面から単純化して全体を見ることの必要性と重要性を教えているように思える。

アンチテーゼへの対応

原子力開発が転換期を迎えている背景のもう一つは、社会が原子力を全面的に容認することに逡巡していることにある。これは原子力政策の中で国民に訴えてきたことを開発のテーゼとするならば、このテーゼの中味のいくつかは達成されてきた。その間、原子力開発が社会との接点でかかえるいくつかの課題と、アンチテーゼに対する対応が併せて十分行われてきたかを考えると、決して十分であるとは言えず、現在アンチテーゼがあたかも中心課題のようになってきている。テーゼの見えぬアンチテーゼの中に落ち込んでいる印象すらある。特に、シェル

ブールの雨傘ならぬフランスのシェルブール港から日本へのプルトニウム海上輸送問題は、この二十余年の間、守り専一の原子力界にどうしようもなく方向転換を要求されるような話題であった。真面目に努力すれば結果が拓けるとの考え方でひたすら計画を具体化し、着実に進めてきた関係者からみれば、海外に再処理を依頼するからには当然その海上輸送はいつか起こり得ることで、なぜいまになってこれほどの反響が起こるのかといぶかる気持ちも理解できないわけではない。日本の技術開発は、明治以来このような地道さと着実さに裏付けられて結果を出し信頼を得てきていたからである。

アンチテーゼが先に走ってテーゼが後からおろおろしながら追いかけていく、あかつき丸の問題についてはそのような状況ではなかったか。テーゼが先にあり、そしてアンチテーゼが出てきて全体の進歩があるという枠組みとはまったく逆の展開が、原子力界をめぐる現在の環境には存在しているように思われる。これは原子力開発のタイムスパンと社会あるいは一般の人々が一つのことに関心を持ち続けるタイムスパンとの明らかな違いによるものであり、社会が一つのことに終始変らぬ関心を持ち続けることの難しさを示すもので、原子力関連情報の社会への伝達の仕方に問題を投げかけたように思える。しかし、その一方で半世紀に及ぶ原子力の研究開発は、その成果をベースにして夢多い将来を再び語ることができるという意味でも転換期を迎えていると言える。

日常性の中での情報伝達

いま原子力界に要求されている最も重要なことは、原子力の開発それ自体に対する認識と長期展望を再構築することであると思われる。日本の原子力開発の展望は、集約した形で原子力長期計画の中に書かれているが、これまで長期計画は原子力関係者にとってのバイブルであったのかもしれない。一つ例え話を紹介しておこう。以前、イスラエルに招かれてエルサレムを訪れた時、多くの宗教の教会に驚いて、ユダヤの知人に「ここはどこの土地ですか」と聞くと「ユダヤの土地ですよ。旧約聖書にそのように書かれています」と即座に返事が返ってきた。確かにエルサレムを少し離れた土地では、ロバがブドウ畑を耕している旧約聖書にあるような光景が現存しているのを見るとなるほどとも思えた。

さて、原子力関係者にあなたの仕事は何故重要かと聞くと、原子力長期計画の中に書かれているからだという答えが返ってくるのではなかろうか。そして長期計画の中に自らの仕事の位置付けを見出し、自分の立場がそこに保証されているような印象を持っているのかもしれない。

一方、原子力開発は何のためにあるのかといった基本的な部分は少なくとも、一般の人々に日常的に繰り返し語りかけられてきたとは言えない。日本の一般の人々にとって、日本の原子力開発の進むべき方向と路線については、常日頃からはっきり明示されてこなかったようにも思える。また、同時に世界の人々に向けても日本の原子力に対する理解と支援を日常的に訴えかけてきたとも言えない。明らかに国内的には原子力発電を中心に社会に定着し、また国際的

にも世界の原子力先進国になった現在、日本が原子力開発をどう捉え、国の政策としてどう位置付けているか、また世界的な視野でこれをどう捉えればいいのかということを、国の内外に積極的かつ明確に示す必要があると思われる。

原子力開発利用長期計画

国の政策としての原子力開発

原子力開発はそのすべてを民間主導で進めるにはあまりにも時間的かつ空間的にスケールが大きく、最低限一国の政策として遂行されるべきことである。このため原子力開発の理念や方向を示す原子力政策が策定され、一国の立場と意思が表現されることになる。当然、国の意思の具体化はその国民の理解と賛同の中に行われなければならない。

日本は、一九五六年に原子力開発に着手し、国の政策として開発を進めてきた。日本の原子力政策は、国民の資源小国であることとエネルギー源の重要さに対する理解と認識を基本に置いてきた。日本の原子力開発は、当初から長期的視点を具体的に表現しているが、その後はその長期的視点を固定して考え、状況認識の方に主点をおいた時期が続いたように思える。長期計画も「改定」という言葉を使っており、約五年ごとに状況に合わせて変えていくということ

が強調されてきた。

日本の原子力開発の長期展望はこれまで国産エネルギーを開発していくことに一つの中心があった。その一つは「動力炉開発の路線」を明確にしたところであり、もう一つは「燃料サイクルの確立」を謳ったことであって、いずれも一九五〇年代の半ばから後半にかけて決められている。エネルギー開発としての原子力開発は、まず軽水炉の導入とその改良標準化によって日本型の原子力発電の早期実用化ということを謳っている。それに加えて、やはり将来の国産エネルギー資源の開発の観点からの、いわゆるプルトニウムの利用の立場が当時から前面に出されている。そしてその中心を担う動力炉が高速増殖炉であると位置付けている。

一方、燃料サイクルについても資源の有効利用の観点から再処理、リサイクル路線を掲げ国内で燃料サイクルを確立し、使用済み燃料をすべて国内において再処理していくという方針を決めていた。また、本命たる高速増殖炉の開発に遅滞が生じた場合を考えて、燃料利用、燃料サイクルに柔軟性を持たせるべくわが国独自に重水減速の新型転換炉ＡＴＲの開発の理念を定義し、この基本的認識が長期にわたって変わらないものとして、その通り走ってきたのであるが、軽水炉の順調な実用化に比べて燃料サイクルの中心である、再処理施設および高速増殖炉開発が種々の理由で当初の計画通り進まなかったことが、いまの段階で社会の原子力の理解に難しさを増している原因の一つとなっている。

当時の原子力開発の長期展望をいまから振り返ってみると、国産エネルギー資源の確保によって発展を遂げ、世界の先進国入りを目指していたと考えられる。そのような環境下で定められた当初の長期計画はやむをえないというよりむしろ妥当なものであり、軽水炉中心の原子力発電はこれまで順調に進められ、電力供給に多大な貢献をしてきたと評価される。

しかし、この間世界の人口は増大し、エネルギー消費は拡大し、人類社会と自然環境は数十年前とは異なってきている。従って、現時点でこのエネルギー開発としての原子力の長期展望に人類社会や地球環境との接点をどう捉え、原子力をこれらとどう調和させていくかという視点を明確にしておく必要があると思われる。

一九五六年に制定された原子力基本法の第一条は、原子力開発の目的を次のように述べている。『この法律は、原子力の研究、開発及び利用を推進することによって、将来におけるエネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、もって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与することを目的とする』。この法律はエネルギー開発を中心にしながらも全体として科学技術の発展に貢献することを謳っていることになり、本書で原子力の定義を「原子力とは放射線と原子核の反応をベースとした総合科学技術である」としたものとは重点のおき方に差があるものの違和感はない。放射線の利用や核融合開発も以前から原子力長期計画の中で示されていたが、一般には原子力発電ほど知られていないように思える。また、放射線と

いう言葉の持つネガティブなイメージが、この分野での研究開発およびその成果の社会への導入を阻害してきたと考えることもあながち的外れと言えない気がする。また、核融合開発も究極のエネルギー源として社会に期待を持って受けとめられているが、研究開発の途上にあることから現実的には社会との直接の接点はなく、原子力発電ほどの社会性は持っていない。

再びテーゼ提言の時代へ

文明論的考察は、原子力を総体として捉え、その可能性の具体化を中心に、将来バランスのとれた総合科学技術体系にすることであり、このことを前提にして議論を展開しておく必要がある。特にここで総合技術としないで、総合「科学」技術と、「サイエンス」という語句を入れたのは、原子力が再び夢を創り、育てる状況になってきたからである。このような位置付けは、これからの日本の原子力開発の展望をする上で極めて重要ではないかと思われる。いまや国産のエネルギーを開発しようとした四〇年前の定義のみでは、原子力開発の総体を捉えられない時期になっていることを認識しておく必要がある。

これまでの原子力開発は、他の科学技術の開発と同様に、環境を無限に大きいものとして、エネルギー資源として原子力の中のいい所だけを取り出そうという発想で進められてきた。平和利用といっても原子力の「利用」であって、それ以上のものではなかったのである。しかしながら、そういった意味において、これからは原子力と人類の共存と調和を目指した原子力開

発への理念の転換が求められている。この「調和」とか「整合性」といった考え方が、原子力開発が半世紀を経過した現在において長期展望に対する高位の理念として加えられたことは重要である。

一九九四年にまとめられた最新の原子力長期計画は、二〇世紀中に行われる恐らく最後の改定であろうが、これまでの日本の原子力開発を振り返りながら二一世紀に原子力開発が順調に進められ、社会に総合科学技術として定着するのに必要な理念、目的、方向、方策あるいは国民および世界への提言等について原点に立ち返っての本質論を展開し、活発な討論を重ねて内容をまとめ、報告書にしている。

その特筆すべき事項の第一は、自らの研究開発の意義を明確にする性格のあった、どちらかといえば関係者、専門家向けの原子力長期計画を一歩進めて、日本国民および世界に日本の原子力開発の理念と方向を示して理解と支援を求めることの重要性を認識していること、第二は原子力開発の理念を「利用から調和へ」と質的な変換を図ったことであろう。従来の原子力の長期計画が平和利用を大前提にしたものの、改定にあたっては量的予測の修正や研究開発分野の拡張等が中心であったのに対し、二一世紀を目前にして、地球環境および人類社会との調和の視点が強調されたことは、昭和三〇年代と基本的に異なる長期的視点であり、当然のことと理解されよう。

長期展望と状況認識

日本の原子力開発は二つの意味で特徴を持っている。一つは原子力開発の長期展望を明確にしながら近未来の研究開発を立案・実施することである。このため、日本の原子力開発は平和利用に徹するという一貫した姿勢で世界の現状を認識し、開発を柔軟に捉え現実的な解決方策を求めてきていることであり、もう一つは原子力を単にエネルギー開発にとどめることなく、関連する分野を広く包含してマルチ・ディシプリナリー（多領域に広がりを持った）な原子力総体を研究開発の対象としていることである。例えば、来世紀に花開く可能性のある基礎・基盤研究として図26に示すテーマを設定し、原子力に限らず、多領域の研究者の参加を得て世界の第一線の研究が行われてきている。

このように日本の原子力政策は原子力委員会の策定する原子力開発利用長期計画で明らかにされており、原子力開発を単にエネルギー開発にとどめることなく総合科学技術として捉えているところにその大きな特徴がある。各国にも一九五〇年代に原子力委員会は誕生したが、例えばアメリカの原子力委員会（ＵＳＡＥＣ）はその後エネルギー研究開発庁（ＥＲＤＡ）と原子力規制委員会（ＮＲＣ）に分かれ、ＥＲＤＡは更にエネルギー省（ＤＯＥ）の創立とともにその中に含まれるようになり、原子力をエネルギー源の一つとして考えるようになった。ドイツも原子力をその総体として扱うことはなく、科学技術省（ＢＭＦＴ）、環境省（ＢＭＵ）で個々に扱っている。これらの国々が現在原子力に対してどんな姿勢を示しているかについて言

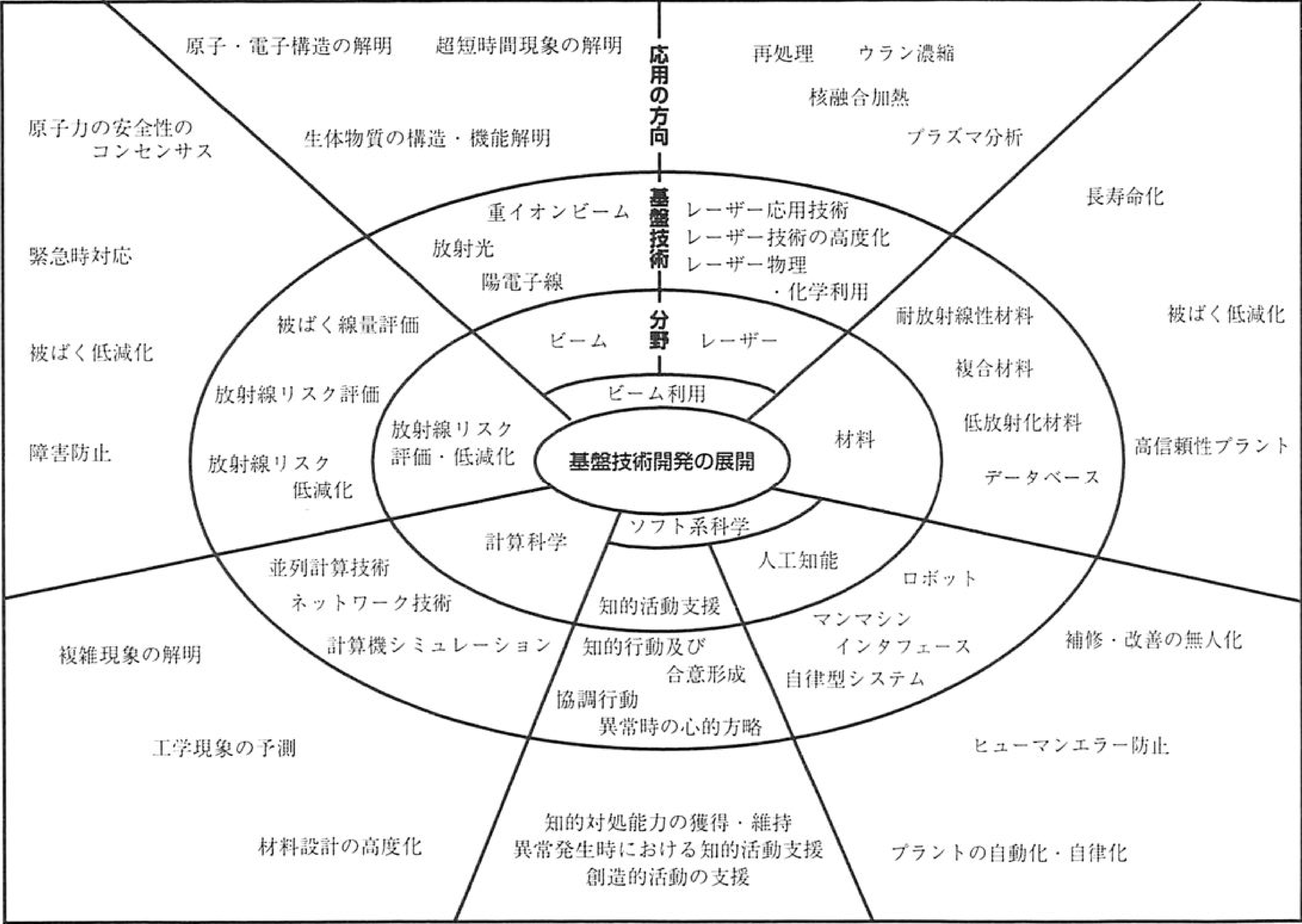


図26　原子力基盤技術開発の展開

出典：原子力ポケットブック
（科技庁原子力局監修）

えば、そのいずれもが原子力の研究開発に対する長期展望を明確にする努力が必ずしも見られず、原子力を総体として捉え、その包含する領域全体を視界の中に入れていない。

このため、原子力をエネルギー開発に限らず原子力文明の発展へ向けての総合科学技術開発と位置付けての取り組みがしにくくなっていると考えられる。その意味では長期計画を常に明確にしながらの日本の原子力開発に対する姿勢は評価されてよかろう。更に中味が十分批判に耐えられるものへと常に改善を心掛けたものであることが望まれる。

一方、原子力政策の策定にあたっては国際的状況を的確に捉え、国際協力、役割分担についての十分な配慮が必要である。日本は、明治時代にその近代化を目指して「脱亜入欧」の言葉に代表されるように欧米の科学技術を導入し、近代社会を構築してきた。この結果、日本を指して「東にある西側の国」と言う外国人がいる。場所は、アジアすなわち東に位置しながら国は欧米すなわち西側並みの技術を持ち、欧米並みの経済状態にあることを意味している。今後日本が科学技術、経済ともに世界の先進国として生きていくには、情報を相互に交換する中で意思の疎通を図ることに十分心掛けて、少なくともアジアの国々に信頼してもらい、これらの国々と協力する中でアジア地域の発展を図っていくことが、国連を通しての協力および欧米との間にこれまでの協力関係を維持していくことと同等、あるいはそれ以上に重要なことになろう。原子力についてもこの構図が変わることは本質的にないと思われる。

国連の人口統計によれば、二一世紀以降に想定される人口・エネルギー・環境のトリレンマの中で、アジアでは人口の急増が予想されると同時に森林の伐採や自然の砂漠化が心配されている。トリレンマの解決の一つが南側での人口増加の抑制と北側での資源消費の削減にあることを考えると、同一地域に南北問題を抱えるアジアで、この解決のために原子力がどのように貢献できるかを考えておくことの重要性は改めて指摘するまでもなかろう。

技術導入と自主開発

ニーズ指向とタイムスパン

戦後一〇年を経て日本は原子力開発に乗り出したが、当時は原子力技術はもちろんのこと、それを支える裾野となる技術基盤も決して充実したものではなかった。従って当時の原子力開発は外国の進んだ原子力技術の導入を一方で行いながら、自主開発を進めるという形をとらざるを得なかったことは容易に理解される。その意味では原子力開発の出発点はエネルギー開発を中心に据えたニーズ指向型開発であったと言えよう。

原子力発電もその意味ではニーズ主導型の開発であったが、すでに民間レベル特に電力を中心に導入意欲が強く、自主開発を待つことなくいきなり英国のコールダーホール型発電炉の導

入へとつながり、更に米国の民間で開発された軽水型発電炉を導入することとなった。

一方、日本型原子力発電を目指しての改良標準化努力が自主開発の中心としてこれと併行して行われ、次第に国産化率の高い原子炉が建設運転されるようになって高品質、高性能の原子力技術が広い裾野を持つ関連技術の整備と共に定着していくことになり、今日を迎えている。

しかし、原子力発電以外の分野についてはこのような幸運には恵まれず、原子力船開発や原子力製鉄を中心に原子力の非電力利用の雄としての高温ガス炉の開発は民間レベルの導入にならず国内での自主開発を待つ形をとった。

原子力船「むつ」

わが国の原子力船開発は、当時の海運国日本、造船国日本の意気込みの中で民間が支え、国の計画として出発した。わが国の海運界、造船界は将来の原子力船の必要性を認識し、積極的に参画して原子力船「むつ」（写真11）の建設を支援した。当時、米国ではサバンナ号、西ドイツではオットー・ハーン号が続いて商船として建造され就航した。このうちサバンナ号は太平洋を航行し、日本にも入港の申し入れがあったが、原子力保険についての日米の考え方が異なり、安全上の問題はなかったにもかかわらず日本入港は実現しなかった。一方で原子力潜水艦や原子力空母は横須賀、佐世保と頻繁に入港する中で原子力商船の入港が認められなかったのは残念であった。サバンナ号は結局、未だ日本復帰が実現していなかった沖縄と、韓国の港



写真11　原子力船「むつ」

に入港して太平洋航海の旅を終えたと聞く。

原子力船「むつ」の建造は、米国から情報が得られない中で最初から国産技術を駆使してつくり上げたもので、原子力発電用の軽水炉の一〇〇分の一程度の熱出力のものであるが、高性能で基底出力から全出力まで三〇秒で出力上昇できる能力を持っていた。航海上の他船の接近や衝突回避のための能力である。「むつ」は周知のように母港を青森県むつ市に決めるまでに紆余曲折を重ねたほか、放射線洩れのため社会的に拒否反応の続く中で苦難の道を歩み、やっとの思いで関根浜の母港から実験航海の旅に出て、計画当初の性能を十分発揮して退役した。

「むつ」が実験航海に至った時、業界にも社会にももはや原子力船待望論や早期実用化願望は姿を消していた。海運界、造船界も時代の流れで決して好況とは言えず、実用化へ向けての明確な戦略は描かれていない。

その一方で二一世紀に向けて高速船時代の到来が予想され、また重油燃料の環境問題も無視できなくなってきているため原子力船の必要性は十分認識しているように思える。第一代の夢多き時代にサバンナ号、オット・ハーン号に加えて「むつ」が同時に世界の海をわが海としていたら事態は変わっていたかもしれない。第一代の夢は半ばで醒めたが、社会が容認するなら原子力船実用化へ向けての動きは一気に高まる可能性を持っている。

高温ガス炉「HTTR」

同様のことが高温ガス炉開発についても言える。高温ガス炉に対する期待はまず製鉄業界から起こった。「鉄は国家なり」と言われ、日本の経済成長を促進した一方の雄である製鉄業界は高炉で使われる強粘結炭の将来の供給に不安を持ち、これを原子力の熱で代替することを期待した。一九六〇年代の終わり頃であった。原子力関係者は強粘結炭という物質と原子力のエネルギーが同等の価値を持つこと、すなわち「エネルギーと物質は等価である」ことが実践できると喜び、製鉄関係の技術者と連携して検討会を持ち計画を進めた。これは同時に原子力委員会の原子力長期計画としても認められ、日本原子力研究所において高温ガス炉の研究開発が

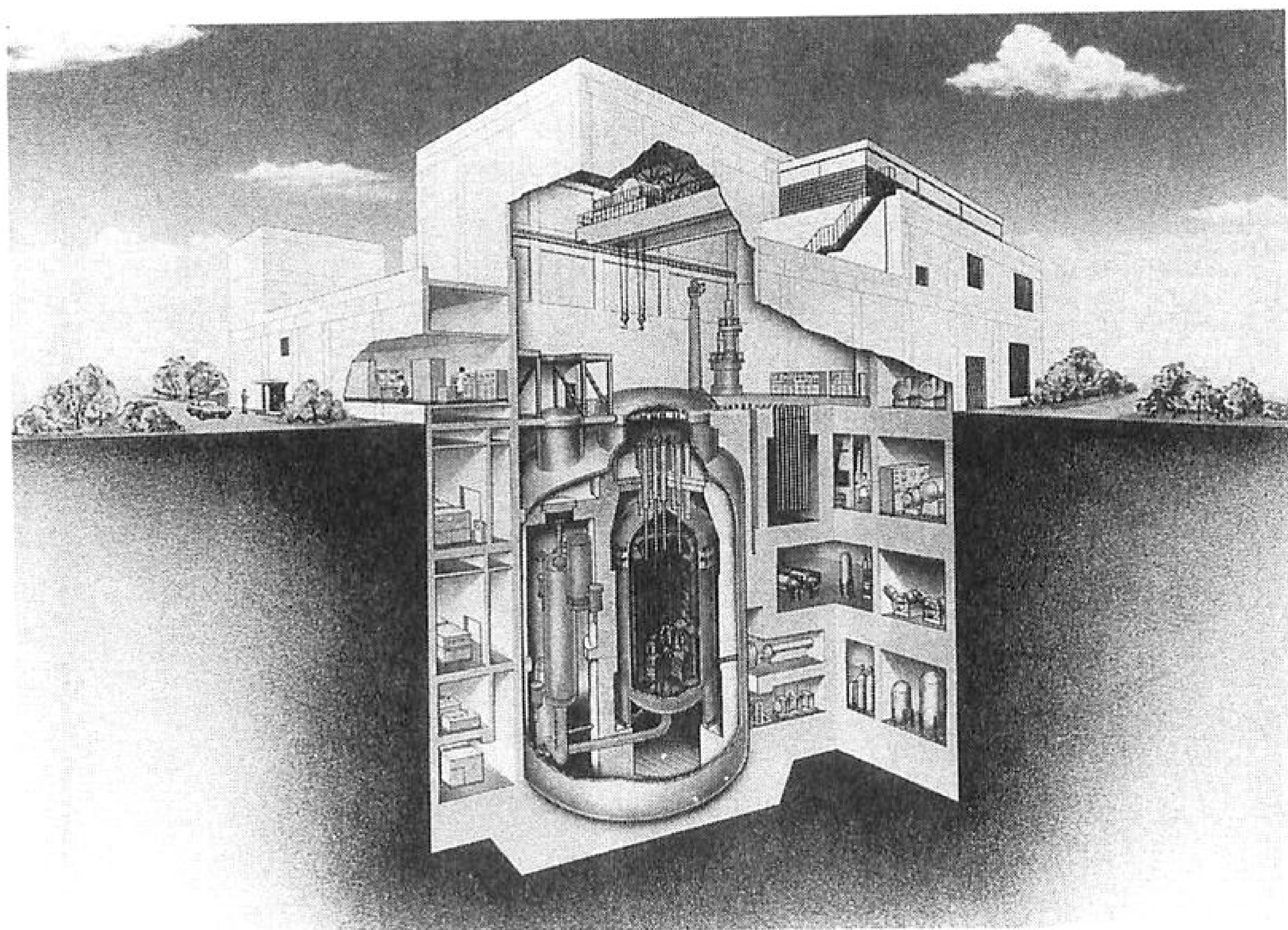


写真12　高温工学試験研究炉（ＨＴＴＲ）の完成予想図

進められる一方、原子炉から出る高温のヘリウムに対する技術開発が進められた。また、熱交換器を使って高温ガス炉からの熱を製鉄プロセスで還元ガスに有効利用する研究開発も進められた。現在、後の二つの研究開発はほぼ完了している。高温ガス炉（高温工学試験研究炉＝ＨＴＴＲ、写真12）自体は、目下建設中で一九九七年の完成を待っている。

一方、いま製鉄業界に原子力製鉄に期待する空気はほとんど見られない。この四半世紀の間に日本の産業構造は変化し、重工業主体の時代は去り、製鉄業界も韓国の台頭などもあって体質改善すなわちリストラを経験している。最初の高温ガス炉開発を支えた応援団が去ってしまっている。これも社会の持つタイムスパン

と原子力開発のタイムスパンとの違いと見ることもできよう。

基礎・基盤の確立の上に

社会にニーズがあってもゼロから開発を始めていたのでは社会がその完成までを待ってくれない、というのが原子力船と原子力製鉄の研究開発での貴重な経験である。オーダーメイドは時間がかかりすぎると言うべきか。原子力開発は「合目的」的開発だと言いながら、むしろ単一目的でなく各種用途に共通した研究開発を進めて具体的開発に備えておくことが望ましい。原子力船を例にとれば、海上を移動するという特性からは小型軽水炉と考えるのが恐らく大方の選択となろう。この範囲に入る応用分野はいくつかあるので共通する開発テーマが出てくる。端的には海洋資源探査がある。舶用炉や海底探査用炉等のほか、砂漠や極地の分散電源等は高い性能は必ずしも要求されないが、一方で運転員が常時滞留する必要のない無人自動運転性能を加えればより具体的なイメージにつながろう。一般的にといっても炉型、出力、性能等をある程度想定しておくことが必要であるが、必ずしも最初から単一目的に絞った研究開発ではない方がよいのではないか。

一方、原子力開発も半世紀にわたる研究開発で多くの知見と経験を獲得してきた。従って今後なんらかのニーズが現れてもこれまでのようにゼロからのスタートではなく、知識や体制等開発のベースとなるものはそろってきているように思える。必要なことは両者のタイムスパン

をそろえる努力をすることである。もちろん、原子力の本流である「自ら整合性ある原子力システム」の構築のような原子力全体を見ながらの研究開発は当然時間が必要であるが、今後の原子力の応用にどのような性能・規模の原子炉が必要となるか、更に原子炉自体の将来の研究開発の方向は予想ができないわけではない。このような応用を主目的としたものについては、研究開発理念の再構築と合理的な投資が必要であり、当然のことながら「利用から調和へ」の発想の転換も求められている。

先進技術と国際貢献

アジアの中の日本

現在の日本の役割として国際貢献は重要であり、将来も先進国としてその重要さが減少することはなかろう。いろいろな側面からの国際貢献が求められることになろうが、その一つはやはり高度技術すなわちハイテクを中心としたものとなろう。

原子力は明らかに高度技術であり、更に加えて巨大技術である。原子力は高品質の部品を必要とするだけでなく、優れたシステムを求めている。外国が日本の原子力に何を求め、期待しているかを十分理解する必要がある。

日本の原子力がこれまで蓄積してきたものは単に高品質の技術だけでなく、安全確保の実績

や運転員の教育訓練がある。日本の原子力の特徴は他の産業も同様だがキメの細かさにある。国の安全規制の体制や方法も安全最優先の立場に立って原則を重視しながらも合理的なワンステップ・ライセンスを採用しており、基本設計の審査から建設許可、更に運転許可までを一貫して行うシステムとなっている。この方法について関心を持ち、将来このような方法を導入したいと考える国々がある。

また、原子力発電の運転員の教育訓練に、日本は優れたシステムと施設、更に加えて指導者を育成してきた。現在すでに旧ソ連、アジアの国々から多くの技術者が訪れ、原子力発電所の見学、教育訓練へ参加している。これらの情報提供は無償に近い形で行ってきた。このような日本の原子力を支えるソフトの部分を通じての国際貢献も一方で重要で、同時にこれが人々の交流につながり、友好関係を続ける上でも忘れてはならない国際貢献になろう。

日本はこれまで核不拡散の立場もあって原子力関係機器あるいはプラントの輸出に対しては慎重すぎるほどの姿勢を示してきた。このため、たとえアジアを例にとってもアメリカ、フランス、ドイツ、更にはカナダが原子力技術の全体を対象に輸出を行ってきたのに比べて、多少の部品の輸出を行ったにしてもシステム全体の輸出を行ったことはない。

しかし、アジアの一員として今後の貢献を重視する上からはもちろん、平和目的に限ることを大前提にしてももっと積極的姿勢が望まれるし、これはまた、アジアの国々の歓迎する方向で行うことができよう。もちろん、このような国際貢献がすべて無償という形をとることにはな

らず、部分的には企業活動を含むことになるのは当然であろうし、欧米諸国の対応も国と民間が協力して行っているところである。

原子力先進国が自らの原子力技術で開発途上の国々に原子力発電所の輸出を行っているのに比べ、わが国には何が欠けているのか、課題は何かを分析し、他の産業同様原子力も海外に目を向けるべき時期にきているように思われる。

日本は原子力の自主開発を続け、高品質の原子力発電所の建設運転が可能になって原子力技術についても世界の先進国となった。しかし、今後の原子力技術の発展については国内に限っての物の見方だけでなく、国際的視野を持つことが必要になってきた。他の産業においても国産技術だけに頼っての考え方でなく、広く世界のマーケットを目指している。例えば、米国の自動車に日本製の部品が使われたり、日本製の電化製品の中にアジアの国々で生産された部品が含まれているといった具合である。

日本の産業の大半がこれまで国内用生産だけに限るものでなく、常に輸出を考えてきた。原子力が例外であるとは言えない。日本の原子力が国際マーケットに進出してこなかったのはなぜか。過去に言われた燃料にしても、日本はすでに濃縮工場は稼働中であり再処理工場も建設中である。日本がこれまでつくり上げてきた高品質の軽水炉（ＬＷＲ）に続いて、新型転換炉（ＡＴＲ）、高速増殖炉（ＦＢＲ）あるいは建設が進んでいる高温ガス炉（ＨＴＴＲ）等々は技

術的には十分他国の製品と競争できるレベルに育てられるのではなかろうか。

日本のプルトニウム政策

平和利用の透明性

日本の原子力政策の基本は平和利用にあり、その一つの中心は国産エネルギー資源の確保と有効利用である。日本は原子力開発の当初よりプルトニウム利用の立場を明確にし、原子力開発利用長期計画の中に位置付けている。その観点からの原子炉開発のステップが「軽水炉から高速増殖炉へ」であり、重水減速のＡＴＲは高速増殖炉の開発が遅れた場合等に備えて燃料サイクル上の余裕を持たせるものと位置付けられてきた。

軽水炉から出されるプルトニウムは高速増殖炉の初装荷燃料としての利用を考えてきた。エネルギー需要が強く、多くの高速増殖炉の建設が求められると最初はプルトニウム燃料が不足することになる。高速増殖炉導入の当初はプルトニウムが不足することが心配された。逆にエネルギーの需要が伸びず、原子力発電に対する需要が強くなければ当然のことながら高速増殖炉の実用化時期にも余裕が生まれ、軽水炉の使用済み燃料に含まれるプルトニウムに余剰が出てきて高速増殖炉以外の原子炉で燃焼させることが必要になる。

日本の原子力開発は平和利用に限っているので、外国に核開発の疑惑を持たれないためにも国の強い意思として余分のプルトニウムは所有する意思がないことを内外に宣言している。プルトニウムは必要な量しか持ちません、との姿勢である。

日本では軽水炉からの使用済み燃料の再処理をこれまでフランス、イギリス両国に委託してきた。海外再処理の結果出てくるプルトニウムはもちろん、廃棄物も引き取ることが契約の条件である。

あかつき丸がフランスのシェルブールから茨城県の東海港に運んだ約一トンのプルトニウムは、日本国内でプルトニウムの酸化物とウランの酸化物の混合である混合酸化物（ＭＯＸ）燃料に成型加工され、「もんじゅ」に燃料として装荷することになる。

一方、原子力開発の出発時からの念願であった国内の再処理施設としては動力炉・核燃料開発事業団の東海事業所の再処理のパイロット・プラントに続いて、青森県六ケ所村に民間第一号の再処理工場が建設中で、近い将来の完成と運転開始を待っている。国内の再処理工場から取り出されるプルトニウムの量は前者から年間約〇・二トン、後者からは約四・八トンで、合計五トン程度になる。この日本のプルトニウム政策に沿って原子力開発利用長期計画では、使用済み燃料から再処理されたプルトニウムはＭＯＸ燃料の形で軽水炉、新型転換炉ＡＴＲおよび高速増殖炉で使用される予定であるが、プルトニウムの収支バランスを核分裂性プルトニウ

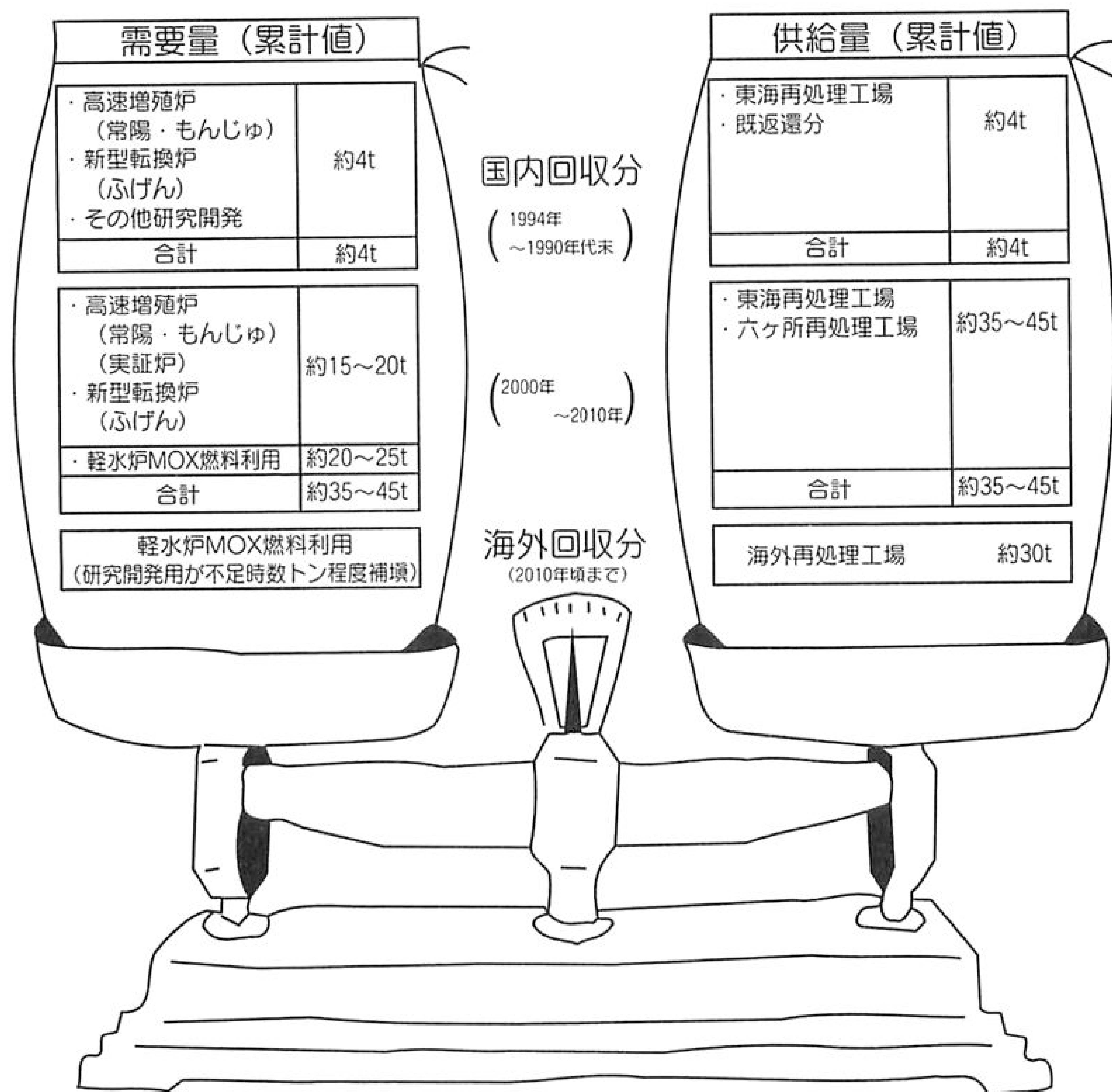
ム（プルトニウム239やプルトニウム241のような中性子によって核分裂を起こすもの）の量に換算して、その予定量は二〇〇〇年から二〇一〇年で三五～四五トン、国内外の再処理工場からの回収量と使用予定量のバランスは図27のように試算している。

もちろん、将来のプルトニウムの需給は原子力開発計画の進捗状況によって変り得るものであるから、現在の試算を固定的に捉えるべきではなく、計画の進捗状況に合わせて余剰のプルトニウムを持たないとの観点から、全体を見直すことは当然あり得ることと考えておくべきであろう。

さて、軽水炉はほぼ完成した技術であり、熟成した技術として理解される。軽水炉は低濃縮ウランを燃料として原子炉の特性、特に炉心の特性が決められている。このためMOX燃料を装荷するにあたっても従来からの低濃縮ウラン燃料との共存性を考え、全体として低濃縮ウラン燃料と同等の特性の範囲で利用することが第一段階として望ましい。

MOX燃料の軽水炉利用についてはフランスやドイツではすでに商業的に利用している。日本では未だ商業規模での生産や利用の段階には至っていない。

日本ではMOX燃料の軽水炉利用についてはこれまで基礎レベルでの特性試験のあと、美浜1号炉と敦賀1号炉で数体の燃料集合体の燃焼試験（注Ⅳ-3）を完了し、データを蓄積している。このような検討の結果、軽水炉の現在の設計を変えないで炉心の三分の一程度にMOX燃料を



注）2010年頃までのプルトニウムの需給バランス
出所：「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」

出典：電事連「原子力図面集」

図27　国内外の再処理工場からの回収量と使用予定量のバランス

装荷することを考えている。

新型転換炉

重水減速の新型転換炉（ＡＴＲ）は日本が独自に開発を進めてきたもので、燃料サイクルのバランスの上からは野球でいうスイッチヒッターの役割を果たし、軽水炉や高速増殖炉のように主軸バッターではないが、左打席にも右打席にも入れる柔軟性を持っている。ＡＴＲは天然ウランを燃料にした使い方もできる。これは日本で濃縮ウランが入手できない場合を想定したものであるが、海外市場でも低濃縮ウランの入手は可能であるほか、青森県六ヶ所村には濃縮工場が既に稼働中であるので、その心配はなくなった。次は、プルトニウム燃料の自立型使用でプルトニウム専焼を目指すものであった。これをプルトニウム自立燃焼（ＰｕＳＳ）と呼び、その可能性が追求されたが、実用化するインパクトが未だない。第三の可能性は軽水炉の使用済み燃料から得られるプルトニウムの燃焼である。このようにＡＴＲは燃料サイクルに柔軟性を持たせる立場からの利用が考えられ、高速増殖炉導入までのつなぎの役割を担うものと位置付けられてきた。

ＡＴＲの原型炉「ふげん」（写真13）は最初からプルトニウムを燃料として一九七九年に運転を開始し、恐らく世界でも例を見ない全炉心ＭＯＸ燃料装荷炉として、これまで多くの実績を重ね、プルトニウム利用に自信を与えてきたことは評価されよう。ＡＴＲはプルトニウム燃

料を炉心全体に装荷することができるため、高速増殖炉の開発が遅れた場合、軽水炉の再処理プルトニウムの燃焼用に優れた原子炉と言える。電気出力六〇万キロワットのATR一基で電気出力一〇〇万キロワット級軽水炉約二基分の使用済み燃料中のプルトニウムが年間消費できる。

しかし、経済性が確立された軽水炉でMOXを燃焼させるプルサーマルの技術開発が進み、近い将来ATRの役割を代替して全炉心にプルトニウム燃料を装荷した軽水炉が実現可能となってきた。フルMOX軽水炉の概念である。このため、これまでの「ふげん」の運転を含むATR国産技術開発の成果は評価しながらも、高速増殖炉導入までのつなぎの役割を果たすというATRの役割を再び問い直す動きが出てきた。これは技術論よりむしろ現代の社会状況の中で生まれたコスト低減化努力の一環であり、原子力開発の長期展望と現実の経済問題の接点であると言える。これも立地問題も含めた原子力開発のタイムパンの長さがもたらしたものと言えよう。

現在は短期的に世界のエネルギー需要が緩み、資源論の観点からの議論は以前ほど盛んでないが、長期的には資源の遍在の影響を受けにくい技術エネルギーとして原子力への期待は大きくなっていくだろう。原子力開発を原子力発電の面だけで、しかも軽水炉中心に考えておくとしたらウラン資源の枯渇といった従来の資源論的観点からの問題に加えて、生み出されたプル

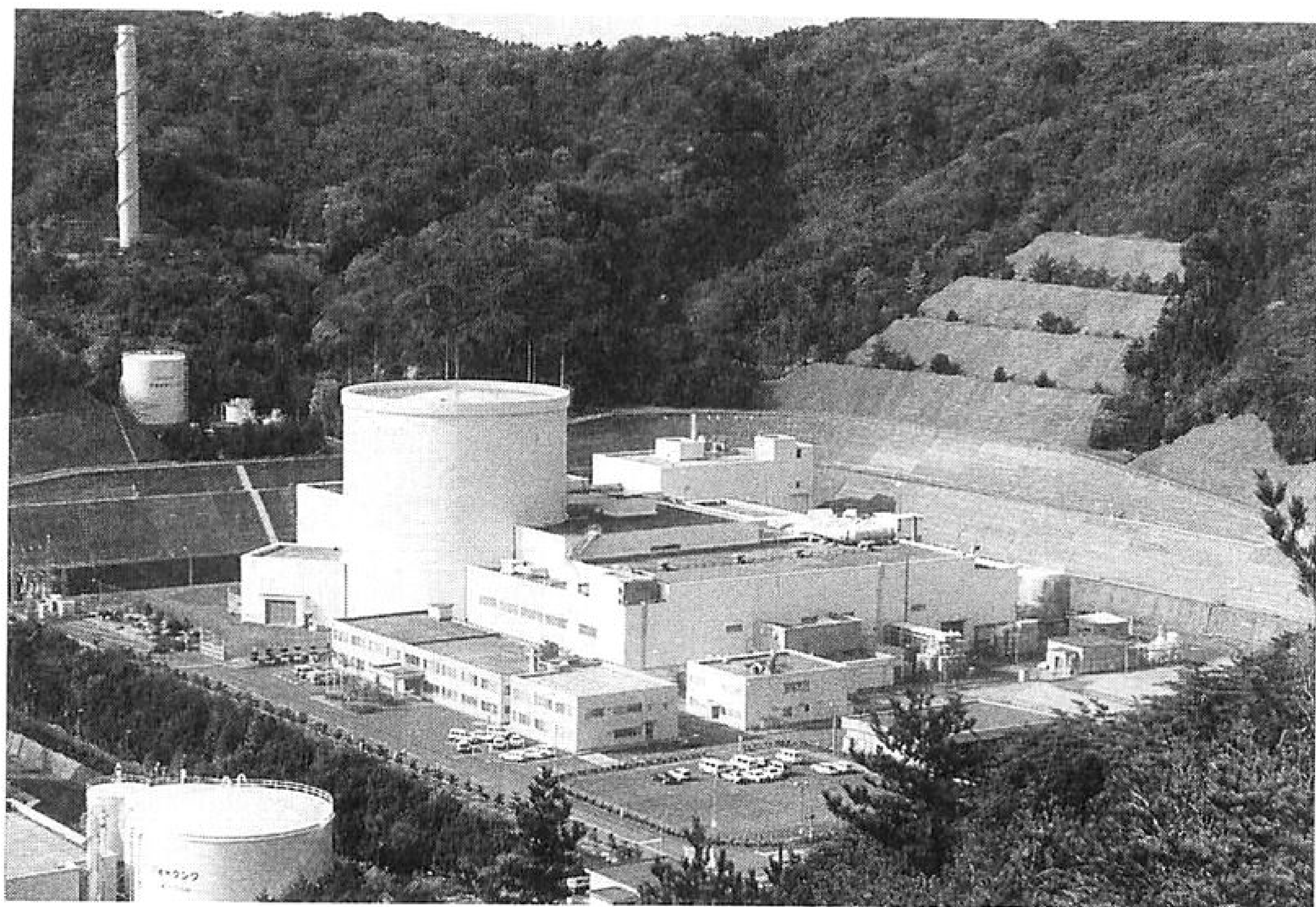
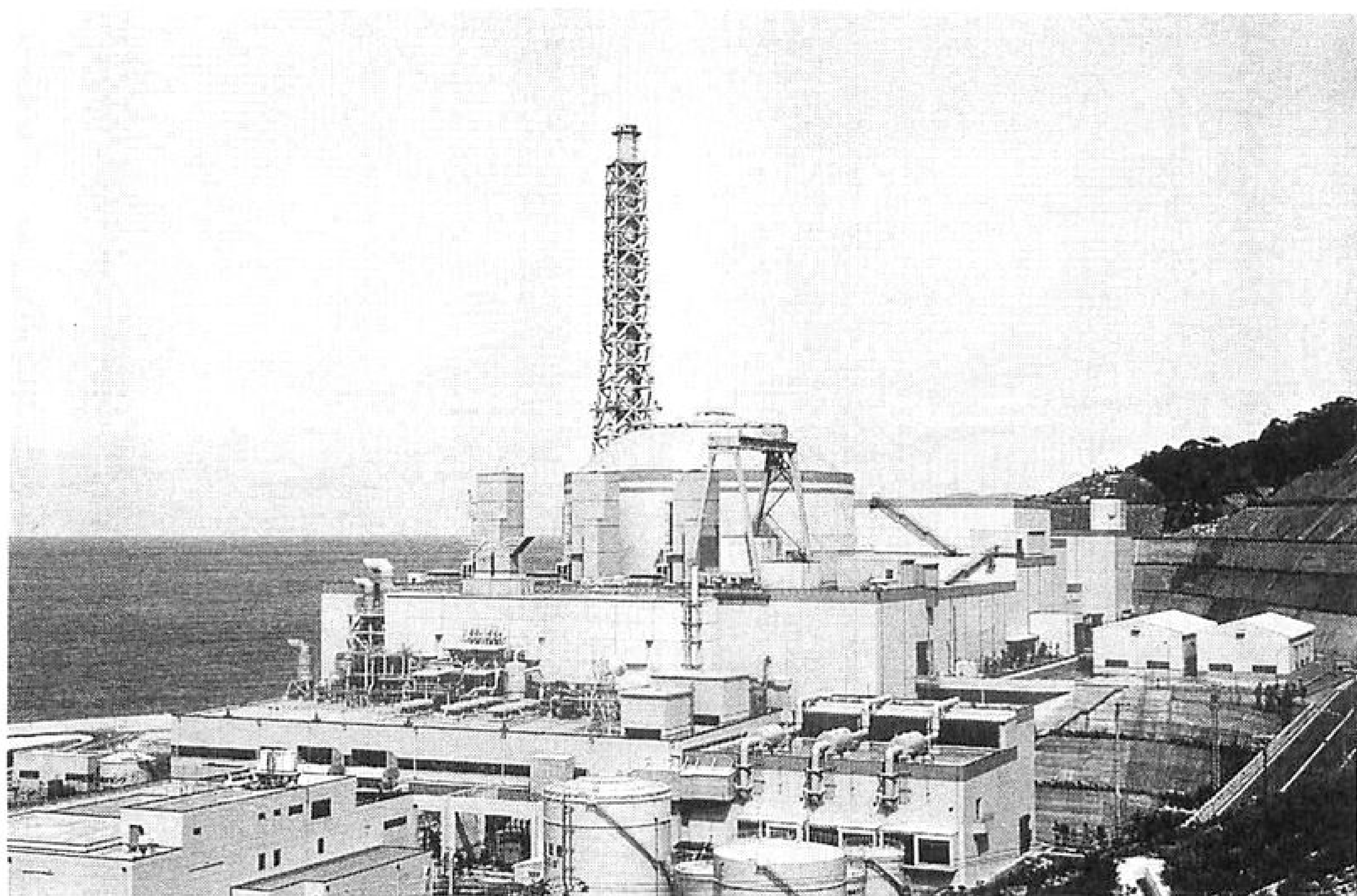


写真13　新型転換炉（ＡＴＲ）原型炉「ふげん」
写真14　高速増殖炉（ＦＢＲ）原型炉「もんじゅ」



トニウムの処理、処分がそれ以上に難しい問題となろう。このため現在の世界政治の上からは当分プルトニウム利用に関しては、制限的で難しい状況が続くにしろ将来的には従来のプルトニウム利用の考え方に加えて、整合性の観点を導入することが重要となろう。プルトニウムの増殖技術と超ウラン元素の燃焼技術は整合性の観点からは共通の技術基盤を持ち、いずれも「自ら整合性ある原子力システム」の構築へ向けての努力であり、どちらかだけの開発を特定する必要はない。

余剰プルトニウムの蓄積に関する核開発の疑念と、将来のエネルギー不足に備えての技術の開発とは明確に区別して議論する必要がある。

高速増殖炉

高速増殖炉（ＦＢＲ）は原子炉の中で核分裂によるエネルギーを生み出しながら、それに伴って消費される燃料より更に多くの燃料を生み出す能力のあるものとして「夢の原子炉」と言われ、原子力開発のエースとして若者に夢を与え、原子力を天職として働く技術者の多くがこの夢を実現すべく原子力界に身を投じたと明言しているところである。また、日本の社会も立地点を中心として高速増殖炉の開発をこれまでサポートしてきたと考えられる。

この夢は諸々の要因により当初目指したタイムスパンでは実用化までには至っていないが、高速増殖炉の持つ付加価値は変わらず、更に放射性物質の消滅という価値が付加されようとし

ている。この炉の持つ高い能力を実現するための研究開発が望まれるところである。経済性が未だ不十分とはいえ、いまでもすでに軽水炉を超えた能力を持つ高速増殖炉の建設、運転は可能である。

日本以外の国が高速増殖炉の開発を中断しているというのは必ずしも正確ではなく、世界に多くの研究が現在もある。しかし、全体として急いでいないのはエネルギー需給のゆるみが第一であり、経済性の達成が難しいためである。更には緑の党、グリンピース等の、いわゆる環境派の反対にあっていること、経済状況の悪化のため開発費の負担に耐えられない等々のためでもある。

日本が新しい視点を加えながら地道に高速増殖炉の技術開発に取り組むことは長期的視点からは肯定されるべきで、日本民族が望む国産エネルギー源の確保につながるほか、原子力エネルギーが次世代の人類社会に受け入れられるために放射性物質の消滅までをその技術の中に取り入れているところに研究開発の意義がある。経済性についても原子炉自体を付加価値の高いものにする一方、多くの先端技術を導入して合理的な高速増殖炉を実現すれば当然経済性は達成できることとなろう。

一九九四年春、「もんじゅ」(写真14、P245)の臨界に成功した。日本がこれを日本の国内での研究開発にとどめず、この開発を世界に公開し、積極的に海外の研究者、技術者を受け入れてセ

ンター・オブ・エクセレンスとして世界の高速増殖炉の研究開発の進展のため提供することは、技術立国の日本として当然の義務であろう。このような国際貢献を通じて日本の原子力開発の透明性を世界に示し、長期展望の中での柔軟性を発揮することが重要である。

原子力は平和利用に限ることは、何度も強調されて当然だが、日本人の強い意思であり、これを客観的に示す必要がある。日本の原子力開発の姿勢を世界に理解してもらい、互いに協力し合うためには、特に世界政治に関連するものとしてどのように透明性を確保するかを考えておかなければならない。世界はこれまで核拡散の心配から燃料サイクルについては全面開放しておらず、秘密の中に安全を確保してきた事実がある。あかつき丸によるプルトニウムの海上輸送に関する情報公開も従来の考え方を基本的に踏襲していた。透明性の確保は国際原子力機関（ＩＡＥＡ）の査察に協力することが最低限の努力でもあり、同時に世界の国々および研究者に広く共同研究の機会を提供することでもあろう。

いま日本がアメリカ、フランスに次いでその恵まれた開発環境をベースにして、三番目のトップランナーとして世界の研究開発の先頭を切る時期にきていると考えている。研究開発に従事している専門家、更に広く原子力開発を見てきた人々にとって長期的観点では開発は地道に続けられるべきであるとの共通の理解がある。

高速増殖炉は軽水炉とは異なる技術体系と捉えるべきで、システム構成、要素技術、安全性は独自性を持つのものと考える。最近は高速増殖炉開発に新しい概念が導入され、研究開発は過

去の技術開発の蓄積を貴重な資産にしながらも新しい目が導入され、よりよいものへと発展してきている。このように現在の高速増殖炉開発は利用の観点からの位置付けから転換して、自然環境や人類社会との調和をより重視した長期的視点をふまえ、「自ら整合性ある原子力システム」を目指すものとして新しい開発の時代に入っている。これは技術合成としての高速増殖炉の原型炉や実証炉の建設・運転と並行して進められるべきものと言えよう。

8 合意形成へ向けて

合意形成へ向けて

原子力「その必要性と安全性」

原子力に関する広報活動は国や地方自治体だけでなく、電力会社を中心とする民間機関も積極的に進めてきた。この動きは大きく分けて「一般の市民を対象としたもの」と「原子力発電の立地点やその候補地の近くに住む人々を対象としたもの」とである。前者は原子力に対する一般的な理解を求めてのものであり、後者は特に事業者の側からは原子力の理解に加えて原子力発電所建設に対する地方の合意形成へ向けての働き掛けの性格を持っていた。このような状況は、広報やパブリック・アクセプタンス（PA）に加えて立地取得の分野での仕事でもあった。

「原子力その必要性と安全性」のキャッチフレーズをベースにして多くの講演会や小グループ相手の説明会が開催された。また、学習会も開かれた。このような地道な活動は表面には表れなくても、日本の原子力開発を底辺で支えるものとなったと理解される。およそ日常生活とは接点を持たない原子力を話すことは相当難しいことでもある。と同時に原子力の必要性を納

得してもらうことについては人々に、ある程度のシンパシィーがあるにしても、原子力発電の仕組みと安全性の話に人々が自ら関心を持つことを前提にすることは期待できず、このような課題に人を引き付けることがそもそものねらいであった。エネルギーを支える原子力の話は話題になりにくく、全体を曲がりなりにも理解してもらうには多くの時間が必要であり、一回に対象とする人数も何万人というわけにはいかない。話す側に一億二〇〇〇万人の日本人全体を対象とすることの難しさがあった。

原子力に対する理解を組織的、系統的に進めることの重要性が認識され、青少年教育の中に取り込む形で情報伝達が行われることが強く期待された。今回の原子力長期計画改定にあたっては人材養成とともに原子力を教育の場で取り上げることの重要性が指摘されており、関係機関で今後中味を具体的に詰め、実践に移すことになるものと期待されている。講演会や勉強会での内容は、原子力発電所が臨界になったとか、高稼働率の記録をつくったとかの肯定的なものにはならず、社会的な反響を呼んだトピックスはどうしても事故や故障に関するもので不安につながりかねない安全上の話が多く、必然的に受け身の説明にならざるを得ない。これはマイナスをゼロに近づける努力にしか過ぎず、正にアンチテーゼ先行パターンそのものであった。

原子力をめぐる社会の動き

原子力を肯定的に捉え、社会の理解と支援を求める活動に対し、核と人類との共存を否定す

る立場に立つ人々の反対運動もまた、その攻撃対象を国および推進側の電力会社に当てる一方、社会運動としても広がりを見せることとなった。イデオロギーの対立や労働運動、地域活動、教育の中と、多くの場で原子力は賛否両論の渦の中に巻き込まれ、冷静な議論の場を設定することが極めて難しい状況もあった。特に少数例とはいえ、国外で起こったスリーマイルやチェルノブイリの事故や、国内での事故例等に対しては反対派の動きはもちろん、マスメディアの対応の仕方は単に原子力の事故がニュースバリューがあるというだけでは到底理解できないこともあった。

国内でのいくつかの事故の例は、もちろん褒められる性格のものではないが、いずれも原子力の安全の基本である放射性物質の閉じ込めが守られているにもかかわらず、あれだけの報道が果たして必要であったのか、いまからでも再び論議の対象とするに遅くはないと思われる。

しかし、原子力の安定した運転が続く中で、原子力に対する理解と支持は次第に日本の社会で進んできているように思える。一九九三年八月の政権交代は連立政権に参加するいくつかの政党の原子力政策が必ずしも原子力を肯定するものばかりではなかったことに危惧の念を覚える人々もいたが、フランスにおけるジスカールデスタンの保守党からミッテランの社会党への政権交代に際しても原子力政策を基本的には継承し、変更しなかったのと同様に、従来の自民党政権の原子力政策を踏襲することになって、原子力に対する理解は拡大すると同時にこれま

でになかったパブリック・アクセプタンスの手法も取り入れられることとなった。今回の原子力長期計画はこの観点を重視し、国民へ、また国際社会へわが国の原子力政策に理解を求めることを大きな目標に掲げるとともに、広く一般国民から意見を聞く場も設けた。

事業者は原子力発電所立地点にＰＲ館を建設して原子力発電に関する情報を模型や絵によって伝達しようとするほか、実際に原子力発電所の内部を見せることによって理解を得ようとしてきている。日本全体で見れば、原子力発電所の見学に訪れた人々はすでに二〇〇〇万人に及んでいる。

このような活動は同時に原子力発電の誘致を考えている人々や団体に原子力発電先進地の人々との間の情報交換や原子力発電の認識をしてもらう機会にもなっている。しかし、原子力に批判的な人々からすれば誘導と見えたり、あるいは過剰サービスと映ったりしているかもしれない。

また、立地点のＰＲ館や電源三法によって設置された図書館、公民館等の施設は単に原子力のＰＲにとどまらず地域に情報の提供や交流の機会をつくり出すなど地域コミュニティーへの貢献もその中に含んでいる。

原子力教育

教育の場での原子力

二一世紀の平和で豊かな社会を支える総合科学技術に成長すべき原子力にとって、これを教育の場でどのように位置付けていくかは重要である。

一国の独立にとって資源、そのうちでもエネルギー資源の確保が重要であることは論をまたない。事実、第二次世界大戦後の日本のめざましい成長は資源小国でありながら安価な石油資源を得られたことが重工業中心、すなわちエネルギー多消費型産業の発展を促したことにあった。原子力開発の出発点も戦後一〇年日本の独立期にエネルギー資源確保の重要性を国民が十分認識し、これを支援したことにあった。このように重要な課題を子供の頃から教育の中で扱い、正確な知識を持つようにすることは情報伝達の基本と言えようし、また一億二〇〇〇万人を対象とする唯一の方法かもしれない。日本が資源小国であること、エネルギー問題は自然保護と密接に関連していること、省資源、省エネルギーの実行の中で豊かさを探っていくべきこと等は、将来成人した時に冷静な判断を行うためにも教育の中で扱っておくべきことであろう。

また、学校教育の中で取り上げられ教科書の中に正確に書かれることはその課題に普遍性を与え、社会的にも重要なこととして大人も認識することとなるところに意味が出てくる。

原子力関係者はこれまで長い間、その悲願として学校教育の中にエネルギーや原子力を取り

込むことを求めてきた。しかし、原子力関係者と小、中、高校の教育の場との意見交換、協議、協力は未だ決して十分でなく、教科書の中にエネルギー問題や原子力の話が総体として取り上げられる段階には至っていない。原子力は教科書の中ではほとんど扱われず、断片的な記述が見られるに過ぎない。エネルギーや原子力がなぜ社会と接点を持つかについての議論が必ずしも整理されておらず、記述のベースがはっきりとしていないと言える。エネルギーや原子力をその本質から記述するよりもむしろアンチテーゼとしての安全性や放射性廃棄物からくる不安が基調にあると心配する原子力関係者もいる。

原子力関係者の努力はこれまで直接教育現場に向ける状況がないままに、中学校や高校の教師に対する講習会、見学会を開くことに向けられてきた。各地の原子力懇談会が窓口となって教育委員会と話し合い、合意を得て春夏の休暇期間等に実施してきた。しかし、理科や社会の先生対象の講習会や勉強会も学校での反映はクラブ活動レベル以上のものに成り得ず、共同で副読本的なものをつくる努力までが限度だったように思える。先生の中には原子力やエネルギーに関心を持つ人も当然多く、積極的姿勢も見られるが、全体として教育現場は原子力やエネルギー問題を肯定的に捉えない空気もあり、積極的な行動を阻害してきたとも言われている。

教育と不易流行

日本の教育は大学入学へ向けての一貫した受験体制が出来あがり、小学校にまで延びてきて

いるという現状がある。この体制に直接関係しない知識は受け付けられなくなってきている。また、原子力やエネルギーのように多領域分野を全体的に捉える必要のあるものは学校教育の中で取り上げるのがそれほど簡単なことではないことも事実であることを十分認識しておかなければならない。必要性を強調するあまり教育の場に一方的に押付けることは厳に慎むべきことであろう。

教育は本来基礎を中心に置き、その中で若者の将来の能力発揮のポテンシャルを養成するところに目的があることは確かであるが、しかし基礎はそれだけ独立して存在するのではなく、それが何のための基礎であるか、また、基礎の上に何が構築されるかを同時に理解できるものでなくてはならない。すなわち、不易と流行（注IV-4）のバランスをどうとるかが常に課題になるべきものである。教育は本来、主として不易の部分を担ってきた。教育の最終段階の大学でさえ流行の部分だけを対象とするのでは抽象化を通じての学問の体系化につながらず、その分野の寿命が決して長くないことを知っている。社会が関心を持っている間だけしか意味のない教育は、恐らく学生一人の人生の長さほどにも続かないことは戦後の産業構造の変化を見ると一目瞭然であろう。

しかし、一方で若者の理工系離れが現実にあり、日本の将来に不安を与えている。状況は好転の兆しを見せてはいるが、その原因が何かを正確に分析して問題解決の方策を探す時期にきている。経済発展の結果、豊かな社会が実現して、その空気の中に変化発展を求めての科学技

術への期待が従来ほどにはなくなっている。現状肯定の社会の空気が青少年にまで影響してきたとする見方も否定できない。

このため、大学や学会を中心に若い高校生や大学生に原子力のオープンスクールや公開講座の開催や、研究施設の開放等によって研究開発の最前線を紹介し、基礎分野、応用分野の関連すなわち不易の部分と流行の部分との関連を示す努力をしてきている。

内容の議論を

従来から青少年教育や学校教育の中にエネルギーや原子力を導入することは決して閉ざされていたわけではなく、むしろ学習指導要領の中でも認められていたが、現実にはスムーズに進められてこなかったと言える。

一九九四年の原子力開発利用長期計画（注IV-5）では若者に原子力の夢と可能性を示し、青少年教育、学校教育の場への具体的導入の重要性について議論を重ねた結果、第四分科会報告書の中に次のように表現している。

『原子力に関係する人材の養成と確保を円滑に実施するためには、原子力開発利用の着実な発展と原子力に対するイメージの向上が極めて重要である。そのため、原子力利用の安全実績の積み重ねと技術水準のいっそうの向上に努めることはもちろん、原子力の必要性、安全性等に関する国民的合意形成の強化を図るとともに、原子力の持つ先端性、将来性等を明確に示し、

原子力を若者をはじめ多くの人々にとって夢のある分野へと再生することが重要である。

とりわけ、青少年期における学習体験が原子力のイメージを形成する上で大きな影響を与えていると考えられることから、多くの人々が原子力に対し公平な判断力を持ち、ひいては今後の人材の裾野を広げるため、青少年に対する正しい原子力知識の普及活動を充実・強化する。具体的には、教師を対象とするセミナー、施設見学会等の充実を図るとともに、青少年の原子力に関する学習機会の確保および充実のため、広報研修施設や学習プログラムの整備・充実、教育用資料の配布等を進める。

なお、学校教育においては、学習指導要領に基づき、原子力を含むエネルギーに関して児童・生徒の発達段階に応じ、適切に指導することとされている。この学習指導要領の趣旨を踏まえ、各学校において原子力を含むエネルギーに関する教育のいっそうの充実が望まれる。』

大学教育を別にすれば現段階で原子力の中心分野である中性子、放射線、安全を理科教育の中に位置付けるところとはなっていない。一方、これを具体的に位置付けたとしてもそれを原子力発電なり加速器なりの応用分野へつなげることは容易ではない。

原子力を総合科学技術として文明の担い手と考えるなら、教育現場と交流しながら、よりよい方向を探るべきであろう。原子力側からも原子力発電の直接の話をあまり強調すべきではなく、むしろ将来石油文明と共存または置き換わるべき原子力文明を総体として教育の場でどのように取り上げるかを議論すべきであろう。そしてその中で原子力が持つ科学技術の基礎と総

体として持つ社会性の中味を教育の場で扱うことを考えていくべきであろう。

日常性の中へ

光は北方より

日本では原子力問題はすぐれて立地問題だと言える。誘致する地元があり、立地についての合意があって初めて計画は具体的なものとなる。

しかし、原子力が地方を求めてきたこれまでの方向は、地元住民を原子力に対して受け身の立場に置くことになり、地域社会から見れば原子力は「彼等」のものであり、「我々」のものと認識するに至らなかったのではないかと思われる。少ない例とはいえ、スリーマイルやチェルノブイリでの原子力発電所事故は人々に不安を与えることにもなった。そのためか、優れた安全上の実績を持つ日本の原子力も十分な社会受容性を得るに至らず、長期間新規立地点について地元の合意が得られず、日本も原子力モラトリアムの状態に入ることが心配されていた。しかし、「光は北方より」とでも言うべきか、四半世紀にも及んだ原子力船「むつ」の問題が解決して母港が決定し、更に実験航海に成功して開発目的を達成したのに続いて、青森県六ヶ所村での原子燃料サイクル施設（写真15）の立地に対する地元合意とウラン濃縮施設の建設と



写真15　六ヶ所村の燃料サイクル施設（建設中の再処理工場）

運転開始、更に再処理工場の建設が始まった。

一方新しい原子力発電所の候補地だった「東通」原子力発電所立地点での地元合意が得られるところとなってきた。これに加えて同県大間町でプルトニウム専焼炉の立地へ向けての動きが出てきている。これらは関係者の並々ならぬ努力と地元の理解のもたらした成果であり、高く評価することはもちろんであるが、それと同時に時代の潮流の変化をみつめ、今後的確に対応することが重要と思われる。

「彼等」の原子力から「我々」の原子力へ

さて、「日本型原子力発電の早期実用化」のキャッチ・フレーズのもとに軽水

炉の改良標準化（表4）が第三次段階へ進む中で原子力発電所の建設が着実に進められてきた。日本の原子力開発の主たる課題の一つは、技術開発だけでなく、原子力発電所の立地点をいかに決定していくかにあった。

昭和三〇年代に端を発する原子力開発は、電力需要の増大に備えて原子力発電を推進する立場からは「原子力、その必要性と安全性」を合言葉に日本におけるエネルギー開発の必要性と重要性を訴え、地方に原子力発電の立地を求めてきた。また、原子力発電の仕組みと安全上の特徴と安全確保の仕方について説明を加えてきた。推進側はこれを原子力の広報あるいはパブリック・アクセプタンスと捉え、中央から地方へ向けての意思表示なり情報の流れを積極的に進めてきた。この訴えは国民の理解に支えられて、建設・運転は順調に進められ、北海道から九州までの海岸沿いに原子力発電所の候補地点が地元合意を得た。この結果、二〇年間に四〇基もの建設が行われ、今世紀末には五〇基を超える原子力発電所が運転される運びになった。原子力関係者が、日本型原子力発電の実用化の当初目標とした、経済性、信頼性、安全性が十分達成されたことに自信と安心を感じているのは理解できる。

このような中央から地方への働き掛けは功を奏したように見えるが、原子力が地方を求める方向は、地元住民を原子力に対して受け身の立場に置くことになり、地域の人々から見れば、これはあくまでも「彼等の原子力」が導入されたのであって、自らが積極的に参画した「自分達の原子力」がそこに生まれたと認識するには必ずしも至っていない。もちろん、立地点とな

		第１次改良標準化計画	第２次改良標準化計画	第３次改良標準化計画
実施期間		1975年度～1977年度	1978年度～1980年度	1981年度～1985年度
主な成果（第３次計画については計画の主な内容）	信頼性及び稼働率の向上	設備利用率　約70% 耐ＳＣＣ材の採用 蒸気発生器の改良等	設備利用率　約75% 制御棒駆動機構の改良 燃料の改良等	①改良型軽水炉の開発・標準化 Ａ－ＢＷＲ：インターナルポンプ新型制御棒駆動機構，高性能燃料等の採用 Ａ－ＰＷＲ：大型炉心，水排除用制御棒，高性能燃料等の採用 ②従来型軽水炉の改良 定期検査（主としてタービン系）に関する改良，廃棄物処理設備の改良，建設工法の改良等 ③標準化プログラム 耐震設計の標準化，許認可関連事項の標準化，標準プラント基本仕様の確立
	定期検査期間の短縮	定期検査日数　約85日 （従来プラトン　90～100日） 格納容器の大型化 燃料交換機の改良等	定期検査日数　約70日 制御棒駆動機構自動交換機の採用 燃料検査システムの改良等	
	作業者の受ける線量の低減	従来プラントの約75% クラッドの発生防止および除去対策 蒸気発生器細管検査の自動化等	従来プラントの約50% ＩＳＩ（供用期間中検査）自動化範囲の拡大 水質分析装置の自動化等	
代表プラント例	BWR	福島第二２号機（運転中） 浜岡３号機（運転中）	柏崎刈羽２号機，５号機（運転中）	ＡＢＷＲ柏崎刈羽６号機，７号機（建設中）
	PWR	川内１号機（運転中） 敦賀２号機（運転中）	大飯３号機，４号機（運転中）	

出典：平成６年版　原子力安全白書

表４　軽水炉の改良標準化

る市町村になんらかの形で原子力発電所を誘致しようとする動きがあってこれが具体化していったわけであるが、全体としては中央から地方へ向けての意思と情報の流れであったと理解される。

原子力はこのように開発の当初から、地方を考え積極的に対応してきたわけであるが、端的に言えば中央集権的枠組みの中での動きであり、地方の時代の先取りとは言っても中央集権から地方分権への動きを先導することにはならなかったように思える。

日本はこれまで中央集権的色彩が政治的にも社会的にも強く、何かを社会に導入定着させることが効率的かつ容易であった。このような特徴も社会が落ち着き、平和と豊かさが満足されてくると、逆に矛盾が目についたり、人々の意思決定への参加意識を刺激することになる。

「地方の時代」とか「地方分権」とかいった発想はこうした人々の意識の変化を表現するものであろう。

無機質、非日常性の克服

原子力発電を「彼等のもの」と見る目にはその巨大、無機質、非日常的な性格に加えて安全に関する不安等が大きく映っていた。形の上では原子力発電の立地を決定し、誘致する上で合意形成のプロセスはあっても、中味はどちらかと言えば原子力発電の持ち込む経済的メリット中心の漁業補償や雇用の促進、電源三法交付金（注Ⅳ-6）等であったと見る人々もいる。これで

は明らかに地域コミュニティーとの間に有機的つながりが不足していたということになる。このため、地域の中には原子力に背を向け、あるいは距離を置く考え方の人々や集団が存在してきた。

最近になって地域との共生という表現に見られるように地域の人々に参加意識を持ってもらう努力が見られる。確かに地域に住むオピニオンリーダーと思える大学関係者や産業界の人々、更には地方自治体、青年会議所（JC）、ロータリークラブ、一般住民それぞれに何を考え、原子力をどう認識しているか、どんな社会参加の形態があるかを考え、地域コミュニティー形成に原子力がどのように参加できるかを考える時代に移りつつあるように思える。これは正に「原子力が地方を見る時代」から「地方が原子力を見る時代」への転換であり、その認識は今後の原子力開発を進める上で重要となろう。「彼等の原子力」から「我々の原子力」への発想の転換は二一世紀社会を見込む上で一つの方向であり、恐らくこの転換なくして原子力に対する理解と正常な発展は望むらくもないのではなかろうか。

「ふくらみ」のある展開

地方の時代とか地方分権の時代とか言われて久しい。しかし、実体としては未だ日本は地方の時代と言うにふさわしい社会形態にはなっていないし、原子力も地方の時代の先駆け的役割を果たすことには未だ至っていない。

一方、地方自治体は地方分権の時代を求めて、それぞれに二一世紀の地域の活性化を目指しており、北海道から沖縄まで種々の活動が見られる。その中には原子力の誘致を模索している地方自治体も多く見られる。地方の活性化は決して日本全体が一律に観光地化することによって達成するとは考えられない。将来の平和で豊かな社会は日本全体を考える立場からの活性化と地域の特徴に立脚した地方の活性化との有機的な連結と役割分担の上に成り立つものと考えられる。地方分権は決して地方の完全独立ではないし、日本全体を考える観点は中央集権的国家への復帰でもない。地方の特徴を活かしながらの融合を図っていくことが「地方が原子力を見る時代」の概念の基本になければならない。

現代社会では石油文明の中においても一国が世界の中で孤立し、鎖国状態で生きていけることができないのと同様、国内にあって一地域が他の地域と無関係に生きていくことは考えられない。その基本的枠組みは原子力文明に移行する中でも変わらず、全体の中で最小限の基本的合意の上に立ってその地域の特徴を十分組み込んだ地域コミュニティーを形成していくこととなろう。

原子力はその意味で全体的性格と地方的性格を同時に併せ持ち得るものとして位置付けられなければ二一世紀以降の人類文明を支え切れないであろう。このとき原子力はこれまでの社会的認識である「原子力イコール原子力発電」ではなく、人類文明をその根幹で支える総合科学技術として社会に理解されることが必要不可欠である。

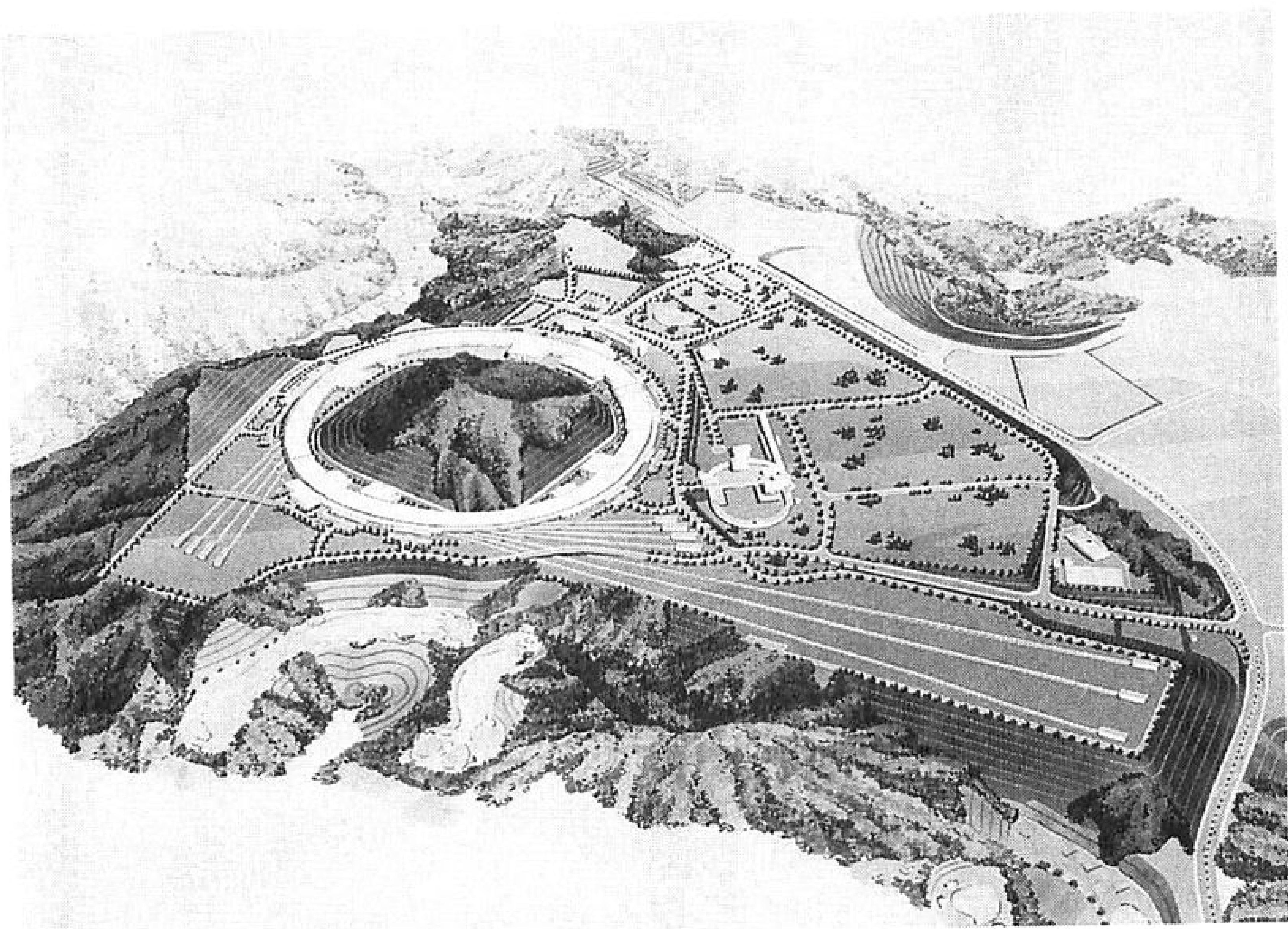


写真16　スプリングー8の完成予想図

日本にもいくつかの原子力先進地とも呼べる地方がある。原子力発電関連施設を指すとすれば北海道、青森、宮城、新潟、茨城、静岡、石川、福井、岡山、島根、愛媛、佐賀、鹿児島の道や県があり、更に原子力発電以外にも千葉に医療用加速器施設が稼働しており、兵庫にスプリングー8（写真16）と呼ばれる放射光施設が原子力の分野の拡大を目指して建設中である。

しかし、これまで原子力発電の数十年にわたる経験を持つ地方自治体でもポスト原発は何かと模索しているところがある。その地域でポスト原発が直ちに再び原発という発想があるとは必ずしも言えないのではないか、少なくともきちんとした形ではないような印象を受ける。ポ

スト原発を再び原発につなげる論理が明確に摑み切れないのと、魅力が欠けているのではあるまいか。このような情勢の中で地域コミュニティー形成の上で総体として原子力がどんな貢献ができるかを考える必要がある。二一世紀のコミュニティー形成への原子力の貢献が望まれるところである。

地方でのこのような活性化計画の中心を占める街づくりを求めての自発的努力を人的にも経済的にも支援し、同時に地域の存在を特徴付ける構想をつくり上げ、住民合意の中で自らが地域の中に溶け込むことで協力していくことが期待されているように思える。

これまで、原子力の誘致の是非がいきなり問題になり、地方の人々は賛否両論の渦中に巻き込まれることが多かったと言われる。何のための誘致かが分からず、将来構想のない中での議論は地元コミュニティーの中に原子力を位置付けるに至らなかったのかもしれない。このような状態では地元合意形成の一助にもとの専門家の派遣も推進・反対の二元論の中でのみ捉えられてしまうように思える。原子力が地元コミュニティーに位置付けられ社会的にも経済的にも地元と結びついていくことが、地元にとって原子力を「彼等のもの」から「我々のもの」へと思考を転換すること、すなわち原子力が地方を求める時代から、地方が原子力を見る時代への潮流の変化を起こすことになる。これが「地方の時代」の先取りにもなり、本来原子力関係者が努力してきた方向でもあろう。

原子力と地域コミュニティー

地域コミュニティー形成の中で

二一世紀社会を想定し、原子力を地域コミュニティー形成に生かしていくためには、あるべき姿を描き、満たすべき諸条件とその達成に至る道筋を明確にしておく必要がある。

二一世紀に平和で豊かな人類社会を想定すればその社会で都市住民と地方住民が目指すものが基本的に変わるものではないであろう。それは現代の社会構造をそのまま固定的に捉えるのではなく、現在すでに表れている社会現象の中に将来を展望することでもある。

二〇世紀後半の社会構造の一つの特色は過密と過疎に代表された。これは国内的には東京一極集中に見られ、世界的にも農村人口の大都市集中で都市に人口があふれスラム街を形成したり、ホームレスの群れとなって社会に不安を与えることにもなった。過密と過疎をもたらした最大の要因は雇用問題と文明の享受に大きな差があったことであろう。これはマクロの利益とミクロの不利益と表現されたり、地方が都市の繁栄の犠牲になると信じられたりで、原子力の立地確保の努力の中でも感情的反発の因となり、「東京に原子力発電所を」なる反論が一定の社会的共感を得る余地を与えることとなった。

このような都市と地方の関係がそのまま固定的に続くものとは思えず、すでにUターン現象によって都市に集中した人口の地方分散が始まっているところである。このように過密と過疎のアンバランスの解消と人口の定着は地方における雇用の確保と福祉の増進とであろう。雇用の確保のためには産業の振興が必要であり、福祉の増進には環境整備が不可欠である。

わが国の環境整備は戦後を脱却するあたりから急速に進められた。全国に張りめぐらされた鉄道中心の交通から全国の主要都市を結ぶ新幹線の建設運転で大量輸送と高速化を果たす一方、道路の整備がはかられた。一九七〇年代には全国の道路は舗装されるところとなり、更に高速道路が全国的規模で整備されているところである。また、航空機による大量輸送の整備が進み、東京から遠く離れた地域への輸送の中心となっている。このような全国の各地域へのアクセスを容易にし、多様化する文化を享受する機会を増大させることはアンバランスの解消の上で重要であるが、かつて新幹線文化の名のもとに全国の特徴が薄れ、文化が均一化する傾向も見られた。しかし、全国的規模での環境整備に続いて地域での環境整備も積極的に進められ、ここには地域の特色が表れている。地域に原子力関連施設を持つ地方自治体は電源三法の補助金を得て公共設備を中心に環境整備をはかり、事業者も漁業権に対する補償等だけでなく、日常性の中で地元への貢献を考えてきている。

地元の古老の話の中に原発誘致以前の環境がどのようなものであったか聞くにつけ、過疎の厳しさを教えられる点が多い。いずれにしろ、原子力は地方の環境整備の上で少なくとも経済

的支援は行ってきたように思われる。

一方、雇用の確保については原子力が直接雇用を誘起する力は少ない。原子力発電の誘起する雇用は建設時に導入される労働者と、定期検査時に導入される労働者が主たるものであり、通常運転に直接間接に関係するのは数百人止まりであろう。

更に国際的に対応する情報、コミュニティー形成への参加等々については原子力は原子力発電単独では対応し切れないのは当然である。これが正に、二一世紀を見込んでその地域がどんな街づくりを目指しているのかのマスタープランの下に原子力が原子力発電にとどまらず総合科学技術として、自らの参加する形態、他の分野と結びつく形態、更に文化的、社会的貢献を図る場などが考えられる。原子力を中心にというより、マスタープランに原子力がどのように関与できるかを考える時代が近づいている。これを地方が原子力を見る時代と言うべきであろう。

アトムポリス構想

地方からの提言

福井県の嶺南地方は早くから原子力発電所が建設されてきた。大阪の万国博覧会に原子力の

電気をとの心意気で美浜１号炉が建設され、見事大阪千里丘陵の万博会場に送電されたことを会場の放送によって知った人もいよう。美浜１号炉が加圧水型（ＰＷＲ）の第一号なら敦賀１号炉は沸騰水型原子炉（ＢＷＲ）の第一号として美浜１号炉共々歴史的意味すら持っている。敦賀や若狭の地にはその後も敦賀、美浜、高浜、大飯に次々と原子力発電所が建設され、高速増殖炉「もんじゅ」の臨界を終えて現在一五基の原子炉が運転中である。福井県の原子力発電の特徴は発電用原子炉としての数と種類の多さにあり、加圧水型、沸騰水型の軽水炉一三基のほかに重水減速新型転換炉ＡＴＲの「ふげん」と、ナトリウム冷却高速増殖炉「もんじゅ」があり、日本はもちろん世界でも特筆すべきものとなっている。

福井県には以前からこの原子力先進県の特徴を生かした街づくりの構想があり、アトムポリス構想と呼ばれてきた。数年前からこの構想の具体化が行われてきた。この構想はエネルギー研究センターを中核に据えることから出発し、若狭湾エネルギー研究センター（注Ⅳ-7）と命名された。基本構想は更に基本計画に進み、計画書の前文でこの研究センターを次のように位置付けている。

『この研究センターは、総合的な科学技術である原子力やエネルギーに関する研究開発拠点を整備することにより、地域振興を図るアトムポリス構想の中核施設として位置付けておりますが、福井県の嶺南地域における原子力発電関連施設の集積を活用しながら、研究、研修、交流の拠点として、広く世界に開かれ、しかも地域に根づいた研究センターとすることを目指し

ています。従って、基本計画の策定に当たっては、世界の先端的な研究内容を求める一方で、地域産業や地域社会に結びついた内容となるように配慮しました。

二一世紀を間近に控えた今日、原子力が立地を求めて地方を見た時代から、原子力が地域コミュニティーをつくる上でどういう役割を果たしうるのかを考える時代、言い換えれば、地方が原子力を見る時代への転換が起こりつつあり、アトムポリス構想の基本理念は、そうした時代の先駆けとなるものです。

この研究センターは、アトムポリス構想のコア（中核）であり、これが地域の様々な活動とコーディネーション（連携）を図り、さらに国の内外の大学や研究機関とのコラボレーション（協力）を進めていくことが必要であると考えます。こうした活動を通じて、この研究センターは、真にコミュニティ（地域共同体）に根づいた存在になりうると思います。この四つのCが、研究センターの理念を表すものと考えています。』

開かれた場へ

アトムポリス構想の具体化には多くの機関、個人が参画し、今後の原子力文明への発展の先駆けとなるかと思えた。正に現在が原子力の転換期であることを示唆しているように思えた。地方自治体である福井県を中心に中央官庁の通産省、科学技術庁、原子力の特殊法人である動力炉・核燃料開発事業団、民間電力から関西電力、北陸電力、更に日本原子力発電が、これに加

えて福井大学、福井医科大学、福井県立大学等地元大学からの教授の方々および東京大学、東京工業大学、京都大学、大阪大学から原子力関係教授が参画し、基本計画までをまとめる一方、財団としての組織化が進んでいった。

研究センターの内容は目的に合致すべく研究、交流、研修の三分野に分かれ、環日本海交流の経験をベースに国際交流、また人口の定着を求めての原子力従事者の研修、地元との交流、更に地域の誇りとなる世界第一級の研究、街づくりの基本となる地域産業との結びつき等、地方が原子力を見る時代の先駆けとなるための構想を具体化していった。

福井県のアトムポリス構想は地元から発想され、地元の意欲で具体化の運びとなり、その過程で中央が協力したことに大きな特徴があり、これが数年後本格的な活動を開始すれば恐らく日本にある原子力先進地に大きなインパクトを与えることになろう。いや、それ以前に各地で原子力を取り込んだ地域活性化構想が具体化していくことが十分考えられ、その胎動がすでに見られるところもある。

原子力文明は原子力発電を含む多くの原子力分野のバランスのとれた成長の上に花開くものであり、地域が原子力関連の何を取り込んでコミュニティー形成を図っていくかはその地域自ら構想し、具体化していくことだろう。

注釈・用語

【第一章】

1―1　平和のための原子力(Atoms for Peace) 宣言　（P8）

米国大統領のアイゼンハワーは一九五三年一二月の国連総会において、「米国は原子力技術の機密化と独占の政策を一八〇度転換し、世界の原子力の平和利用のために核分裂物質（ウラン）と利用技術を供出する用意のあること」を提案した。

1―2　シカゴ・パイル1号（CP―1）　（P12）

イタリアからナチに追われてアメリカに亡命してきたエンリコ・フェルミは、ドイツでウランの核分裂の現象が実験で確認されたことを聞き、すぐさま核分裂の連鎖反応の可能性を思いついた。フェルミはこれを実験で確かめるため、シカゴ大学フットボール・スタジアムの中のスカッシュコートに五〇トンの天然ウランと五〇〇トンの黒鉛ブロックを積み上げた最初の原子炉をつくり、一九四二年一二月二日に人類最初の核分裂の連鎖反応に成功した。これがシカゴ・パイル1号で、黒鉛ブロックを積み上げてできていることから、原子炉のことをパイル(pile)と言った。

1―3　軽水炉が現実に発電用原子炉として実用化されたのは……　（P14）

藤家洋一著

「21世紀社会と原子力文明」（日本電気協会新聞部刊）P114～115参照。

1―4　超ウラン元素（TRU）　（P17）

天然に存在するのは原子番号が92のウランまでであり、これより大きな元素はすべて人工でつくられた元素であり、超ウラン元素と呼ばれる。現在原子番号103のローレンシウムまでつくられている。原子炉の中では、ウランの中性子吸収、核変換等によりネプツニウム、プルトニウム、アメリシウム、キュリウムといった超ウラン元素がつくられる。超ウラン元素の特徴は、プルトニウム239は二万四三六〇年、プルトニウム240は六五八〇年、アメリシウム241は四五八年といった風に放射能の半減期が長いものが多い。

1―5　高温ガス炉　（P25）

原子炉出口ガス温度が七五〇度以上のガス冷却炉で、冷却材のガスには熱伝達率の高いヘリウムが使われる。高温が得られるため、発電だけでなく製鉄、化学工業の熱源にも利用が可能である。米、独で実験炉、原型炉が建設、運転されていたが、一九八〇年代末までに運転が終了または中止となり、現在稼働中の高温ガス炉はない。日本では日本原子力研究所が研究しており、一九九七年の運転開始を目指して試験研究炉（HTTR）を東海村に建設中である。

1―6　エンリコ・フェルミ　（P37）

一九〇一年イタリア生まれの物理学者。フェルミは中性子照射による核反応の研究の業績により、一九三八年にノーベル物理学賞を受賞している。ウラン等の金属に中性子を照射する一連の実験のなかで、減速された中性子による核反応の効果は、減速されていない高速の中性子によるものよりもはるかに大きいことを発見しており、このような業績をベースに、一九四二年人類最初の原子炉（シカゴ・パイル）をつくった。

Ⅰ-7　トリウム232はウラン238と同様に核分裂を起こす物質に転換　（P50）

核分裂しないウラン238が中性子を捕獲するとウラン239になるが、核変換（ベータ崩壊）によりネプツニウム239を経て核分裂性のプルトニウム239になる。同じように、核分裂しないトリウム232に中性子を照射すると、トリウム233からプロトアクチニウム233を経て核分裂性のウラン233が生成される。核分裂性のウラン235は天然には〇・七％しか存在しないが、天然ウラン鉱中に九九・三％存在するウラン238やウラン鉱とほぼ同量存在するトリウム鉱（トリウム232の存在率は一〇〇％）を核分裂性物質として利用できることになれば、人類が利用できるエネルギー資源量を大幅に増やすことになる。

Ⅰ-8　溶融塩炉　（P50）

燃料としてウランやトリウムの低融点塩類（フッ化物等）を溶融状態で使用する液体燃料原子炉。この型の原子炉は、液体燃料なので再処理工程を付けることにより発電しながら連続的に再処理できること、減速材に黒鉛を使うことによりトリウムを親物質とする増殖炉が可能であること等の特長を有している。米国のオークリッジ国立研究所で開発が進められ、一九六五年より実験炉のMSRE（Molten Salt Reactor Experiment）が運転されたが、一九七〇年代末に開発が中止された。

Ⅰ-9　トリチウム　（P51）

質量数が三の水素の同位体で（陽子一個と中性子二個からなる）、三重水素ともいう。^{3}Hまたは T の記号で表す。ベータ（β）崩壊し、半減期は約一二年。核融合技術が実現すれば、D（重水素）・T（トリチウム）反応の原料になるが、天然にはほとんど存在しないため、リチウムに中性子を当てるとアルファ線とトリチウムになる核反応等を利用してつくる。

一-10　核実験　（P59）

一九四〇年代後半から一九五〇年代は、米ソを中心とした核兵器開発競争が行われ、米国はネバダ砂漠の中のテスト・サイトや太平洋のビキニ環礁で、旧ソ連はノバヤゼムリアとセミパラチンスクで大気中の原水爆実験を行った。大気圏内での核実験を禁止した部分核実験停止条約の発効した一九六三年までに大気中で約四〇〇回の原水爆実験が行われ、約二億トンの放射性物質が環境に放出された。また、その後は地下核実験が継続された。

一-11　混合酸化物燃料（MOX、Mixed Oxide）　（P68）

ウラン酸化物（UO_2）とプルトニウム酸化物（PuO_2）の混合燃料のことである。高速増殖炉（FBR）では、ウラン酸化物に対してプルトニウム酸化物が二〇％程度混合されたものを燃料としている。軽水炉ではウラン燃料を使うのが通常であるが、ウラン燃料中のウラン235の代わりに、六～八％のプルトニウムを混ぜたものを燃料として使うことができる。軽水炉や新型転換炉のような熱中性子炉（サーマル・リアクター）の燃料としてプルトニウムを使うのを、プルサーマルという。

【第二章】

二-一　（P102）

Global Environment & Nuclear Energy Systems (Proc. Int. Symposium of GENES)(Pergamon社) P480参照。

Ⅱ-2　天然ウラン燃焼の重水炉（CANDU、CANada Deuterium & Uranium）（P132）

CANDU炉はカナダが開発した原子炉で、減速材に中性子吸収が少なく、中性子減速能力の大きい重水を使用しているので、天然ウランを燃料とすることができる。わが国で開発されたATR（新型転換炉）と、重水を減速材に使い、圧力管型の原子炉である点は同じであるが、圧力管の向きが水平で加圧水型のCANDUと、向きが垂直で沸騰水型のATRの違いがある。

Ⅱ-3　ネバダ州の砂漠の地下深く（P132）

一九八二年に制定され、一九八七年に修正された核廃棄物政策法（NWPA）により、商業用原子力発電所の使用済み燃料と軍事用施設からの高レベル放射性廃棄物のガラス固化体の処分は米エネルギー省（DOE）が行うこととされ、その処分候補サイトをネバダ州ヤッカ・マウンテンに絞った。処分開始は一九九八年一月三一日までとされていたが、地元ネバダ州の反対等によりスケジュールが度々延長され、現在は二〇一〇年まで延長されている。

Ⅱ-4　国際核燃料サイクル評価会議（INFCE）（P132）

核拡散防止の観点から核燃料サイクルを国際的に評価し直そうというカーター大統領の呼び掛けにより、一九七七年一〇月ワシントンにおいてINFCE設立総会が開かれた。この総会には四〇カ国、四国際機関が参加した。八つの作業部会に分かれて検討が行われ、二年四カ月にわたる作業を経て、一九八〇年二月のウィーンにおける最終総会で最終コミュニケが採択され、次の三点が強調された。

・世界のエネルギー需要を満たすため、原子力は広く利用されることが可能であり、また広く利用されるべきである。

・保障措置は核不拡散と原子力の平和利用の両立のために重要な手段であり、この保障措置を更に効果的なものにするため、保障措置の方法および技術の改良を進めるとともに、原子力平和利用と核不拡散の調和を図るための、新たな国際制度の構築や核不拡散に有効な技術的代替手段の確立を図る措置がとられるべきである。
・原子力の平和利用に関する開発途上国の特別のニーズを満たすため、効果的な措置がとられることが可能であり、またとられるべきである。

Ⅱ-5　新型液体金属炉（ALMR、Advanced Liquid Metal Reactor ）　（P133）

液体金属ナトリウムを冷却材に用いた高速炉の経済性と安全性を向上させた小型モジュール型高速炉のことである。経済性向上のために、プラント構成機器の標準化と工場製作とプラント一体輸送が可能なように小型のモジュール化している。安全性向上のために、通常運転時の燃料温度が低い金属燃料を用いた小型炉心とし、運転員の誤操作や機器の故障に対してタフな受動的安全性を持たせた設計としている。

Ⅱ-6　一体型高速炉（IFR、Integrated Fast Reactor)　（P133）

新型液体金属炉（ALMR）のサイトに燃料再処理施設を併設し、発電と再処理および燃料製造を同時に行うオンサイト再処理の概念。再処理工程では電解精製の乾式法が考えられている。

Ⅱ-7　ピューレックス法　（P134）

使用済み核燃料の再処理法の一種で、動燃事業団の東海工場、仏コジェマ社のラアーグ工場等現在はもっぱらこの方法が主流となっている。使用済み核燃料を硝酸溶液で溶かし、有機溶

媒の三ブチル酸塩（TBP）でウランとプルトニウムを抽出し、核分裂生成物（高レベル放射性廃棄物）と分離する方法である。

II-8　プルサーマル　（P135）

プルトニウムは高速炉で燃やすのが最も効率がよい使い方であるが、高速増殖炉の開発が遅れている現状では、再処理によって回収されたプルトニウムを軽水炉等の熱中性子炉で利用することをプルサーマルという。核分裂で発生した高速の中性子が減速材により結晶格子の熱運動並の低速度になった中性子を熱中性子（サーマル・ニュートロン）ということからこのように言う。

II-9　ガラス固化体　（P138）

ガラスは耐水性、耐熱性に優れ、非常に長い期間安定な性質を持つことから、高レベル放射性廃棄物を閉じ込める物質として選定されている。再処理で出てきた高レベル放射性廃液を蒸発缶で濃縮し、溶融したガラス（ほう主酸ガラス）と混合し、ステンレス鋼製の容器(キャニスター）に流し込み、冷却固化したのち密封される。一〇〇万キロワットの原子力発電所一年間の運転により発生するガラス固化体量は、約三〇本のキャニスターになる。

【第三章】

III-1　スリーマイル事故　（P153）

一九七九年三月二八日、米国ペンシルバニア州のスリーマイル発電所2号炉（出力九六万キロワット）で起きた事故。事故は機器の故障、原子炉の設計不具合、運転員の判断ミス等が重

なって起きた。炉心の約三分の二が溶融したにもかかわらず、格納容器が健全であったこと等により、環境に放出された放射性物質はわずかであった。このため、周辺住民の放射性被ばく線量は最大で約一ミリ・シーベルトで、健康への影響はなかったと報告されている。

III-2　チェルノブイリ事故　（P153）

ウクライナ共和国のキエフ市の北方約一〇〇キロメートルにあるチェルノブイリ発電所4号炉（出力一〇〇万キロワット、黒鉛減速・軽水冷却炉）が、一九八六年四月二六日に起こした史上最大の原子炉事故。事故は、低出力で暴走しやすい設計、頑丈な格納容器がないこと等の安全設計の欠陥や、各種安全装置を切って実験を行った運転員の様々な違反行為が重なって起こった。事故による直接の死者は三一名であるが、黒鉛の火災が発生したために大量の放射性物質が放出され、広範囲に汚染された。このため住民への健康への影響が危惧されている。

III-3　伊方1号炉での出力調整試験　（P153）

四国電力伊方1号炉（五六万六〇〇〇キロワット）での出力調整運転は、全出力から三時間かけて出力を五〇％まで下げ、そのまま六時間運転した後、再び三時間かけて全出力まで戻す「12—3—6—3」の将来予想される代表的なパターンの運転で、一九八七年一〇月に行われた。ところが二回目の一九八八年二月に実施する時には、反原発グループの「チェルノブイリ事故と同じ低出力試験は危険」とのアジテーションに主婦層を中心とした反対者が伊方発電所や四国電力本店に押し寄せた。この反対運動がきっかけになってこの年の反原子力運動は大きなうねりとなって都市部に広がっていった。原子力発電所の出力調整運転は、米国、独、仏等原子力先進国では日常化しており、日本でも東京電力が福島第一3、5号炉で一九八〇年八月から一九八三年にかけて試験的に実施している。

III-4　敦賀1号炉での廃棄物貯蔵建屋からの放射性物質の漏洩　(P153)

一九八一年四月、日本原子力発電敦賀発電所の雨水等を流す一般排水路や浦底湾の海底土等からコバルト-60等が検出された。原因は同年三月八日に1号炉の放射性廃棄物建屋内で放射能廃液の床面への漏洩が発生し、その際洗濯廃液処理建屋床面と壁の隙間から同建屋地下を通っていた一般排水路に廃液の一部が流入していたためであった。これは四月一八日の通産省の暁の記者会見により、マスコミが一大事と思い込み、社会的事件となった。敦賀湾に放射洩れと大きく報道されたため、敦賀の魚が売れなくなるという風評被害も発生した。

III-5　浜岡1号炉のポンプ停止　(P153)

中部電力浜岡1号炉(出力五〇万キロワット)が定格出力で運転中の一九八八年二月一日、原子炉再循環ポンプ二台が停止した。炉心流量が自然循環による流量まで緩慢に減少し、出力が自動的に二二万キロワットまで低下し、約一二時間後に手動停止された。再循環ポンプ停止の原因は無停電電源装置の電磁スイッチの焼損によりポンプ駆動装置の潤滑油温度検出器の電源が喪失したためであった。当該スイッチの焼損により循環ポンプの制御系だけでなくタービン制御系、給水制御系、制御棒手動制御系等の電源も喪失し、長時間原子炉が制御不能な不安全な状態に置かれたのではなかったかと報道されたが、電源が断たれてから一分後には予備電源を働かせ、制御系統は回復していた。

III-6　福島第二3号炉でのポンプ溶接不良　(P154)

東京電力福島第二3号炉(出力一一〇万キロワット)が一九八九年一月一日、出力一〇三万キロワットで運転中、B原子炉再循環ポンプの振動が上昇したため、ポンプの回転数をわずか

に低下して一〇〇万キロワットで運転を継続した。しかし一月六日に同ポンプの振動が再び大きくなり、原子炉を停止した。原因はポンプの水中軸受けリングが脱落して割れており、羽根車の一部が破損していた。ポンプの振動大の警報が出たにもかかわらず出力を下げて運転を継続したこと、羽根車等の磨耗により生じた金属粉の原子炉残留による同炉の運転再開の安全問題がマスコミや反原発グループで大きく騒がれた。

III-7　美浜2号炉の蒸気発生器伝熱管破損　（P154）

関西電力美浜2号炉（出力五〇万キロワット）で一九九一年二月九日に蒸気発生器の伝熱管一本が破断し、非常用炉心冷却装置（ECCS）が作動する事故が発生した。原子炉は安全に自動停止し、放出された放射能はごくわずかで周辺環境への影響はなかったが、わが国でECCSが実作動したのは初めてであったことからマスコミで大きく報道され、社会的事件となった。

III-8　志賀1号炉のポンプ停止　（P154）

北陸電力志賀1号炉（出力五四万キロワット）が定格出力運転中の一九九四年八月二六日、二台の再循環ポンプのうちの一台が停止し、出力を二〇万キロワットに低下して運転を続けたが、県の指導で一二時間後に原子炉の運転を停止した。原因は、ポンプのインバータ制御回路の配線の絶縁不良であった。同炉が石川県の最初の原子炉で運転開始から一年しか経っていないことと、故障の原因究明に四日もかかったこと、地元への異常事象の通報遅れ等が重なり、県内で連日マスコミで大きく報じられる事件となり、故障原因判明後運転再開までに九日もかかった。

Ⅲ-9　ホルミシス効果　（P160）

「ホルミシス」は「ホルモン」と同じ語源を持ち、「有害な量以下の少量の作用源が好ましい生理的刺激を引き起こすこと」を言い、このような効果を持つものに抗生物質、ビタミン、必須ミネラル、酒等がある。放射線ホルミシス効果としては、免疫機能の向上、疾病への抵抗力の増加、発ガン抑制、寿命延長、放射線に対する抵抗力の増加等が報告されている。これまでの動物および培養細胞を使った実験では、放射線ホルミシス現象は一〇～一〇〇ミリグレイ付近で多くみられている。

Ⅲ-10　SL-1事故　（P167）

SL-1は米国の原子炉開発初期の小型の原子炉（熱出力三〇〇〇キロワットの沸騰水型原子炉）で、一九六一年一月、定期点検中に原子炉暴走事故を起こし、三人の作業者が死亡した。事故原因は原子炉が一本の制御棒の引き抜きで超臨界になる設計だったことと、作業員が制御棒を急速に引き抜いたためとされている。これが契機になって、米国では反応度事故に対する技術基準が整備された。また、この事故で原子炉は壊れたが、格納容器外への放射性物質の漏洩がなかったことから、格納容器の有効性が確認された。

Ⅲ-11　WASH-740レポート　（P175）

米国で最初の商業用原子力発電所が運転に入る前に、企業が負担すべき責任保険の金額を算定するため、重大な事故による損害の程度を知る必要に迫られた。このためブルックヘブン国立研究所が、熱出力五〇万キロワットの原子炉に含まれる放射性物質の五〇％が外部に放出される重大事故シナリオを想定し、被害の推定を行った。死者三四〇〇人、負傷者四万三〇〇〇人、被害額七〇億ドルと推定された。調査結果は、一九五七年三月原子力委員会（AEC）に

報告された。

III-12　プライス・アンダーソン法　（P175）

一九五七年に米国の商業用原子力利用に対する事業者の損害賠償責任保険と国家補償協定からなる事後救済制度を定めた法律。責任の限度額は五億六〇〇〇万ドルと定められたが、同法が延長される一〇年毎に引き上げられており、現在約七三億ドルとなっている。限度額を超える事態になった場合には、議会の議決により必要と判断される手当てを行う。

III-13　イベント・ツリー　（P175）

確率論的安全評価の中で用いる手法で、安全設備の作動成功／失敗の論理的な展開により事故の進展シーケンスを簡単に表す論理樹枝線図を作成して評価する手法である。

III-14　フォール・ツリー　（P175）

前記のイベント・ツリーに出てくる各安全設備の機能達成に関する非信頼度を求める手法で、安全設備の機能喪失を各機器の故障の組合せで論理的に（論理積と論理和を用いて）表したものである。

III-15　WASH-1400（ラスムッセン報告）　（P175）

プラントの各部品レベルの信頼性データを積み上げ、重大事故に至るあらゆるケースについて、その発生確率を計算して安全性を評価するのが確率論的安全評価（PSA）。一九七五年にラスムッセン博士が行った報告では、原子炉のような巨大で複雑なシステムについて初めてPSAを用いた。

III-16　クラス9事故　（P183）

米国の原子炉の安全規制において、異常事象・事故をクラス1〜8に分類し、クラス8を安全評価対象の設計基準事故とした。この想定されたクラス8の事故を超える事故という意味でクラス9事故といった。いまでいうところの苛酷事故に相当する。

III-17　受動的安全炉　（P193）

故障や事故の際も原子炉の停止および停止後の崩壊熱の除去をポンプ、電動弁等の動的機器を用いず、自然の摂理（重力、自然対流等）を駆動原理とする受動的安全設備を備えた炉を言う。重力等を駆動原理とすることから出力レベルは大きくできないが、システムの単純化、更には人の介在を極力排除することができ、安全性の一層の向上を図ることができる。

III-18　PIUS　（P193）

スウェーデンのアセア・アトム社が考案した受動安全炉（電気出力二〇万キロワット）でボロン水を満たしたプレストレスト・コンクリート製の圧力容器内に原子炉、蒸気発生器、冷却材ポンプを設置している。異常事象が起これば、密度差ロック部の圧力バランスが崩れてボロン水が自動的に炉内に入り、核反応が停止するとともに、自然循環により崩壊熱の除去が行われる。

III-19　煤煙の放射線による浄化　（P212）

排煙にアンモニアを添加して電子線を照射すると、排煙中に含まれる硫黄酸化物、窒素酸化物がアンモニアと効率よく反応して除かれ、また副産物として肥料の硫酸アンモニウム（硫

安）、硝酸アンモニウム（硝安）の混合物が生成される。この方法は、脱硫、脱硝を一段階で行え、乾式であるため排煙処理も不要等の特長を有する新しい環境保全技術である。

III-20　原子炉の熱で海水を脱塩　（P213）

福井県の大飯発電所で、二次系の蒸気の一部を使用して海水を蒸発させて所内で使う純水をつくっている。一九九四年の異常渇水時には、この純水が地元の大飯町に供給された。

【第四章】

IV-1　クルチャトフ　（P219）

一九〇三年生まれのロシアの核物理学者（一九六〇年没）。クルチャトフ博士は、米国におけるフェルミ博士に相当する人物で、一九四〇年にウランの核分裂連鎖反応の可能性を予測し、旧ソ連最初の原子炉Φ（エフ）-1炉を第二実験所（現クルチャトフ研究所）内につくった。Φ-1は、フェルミ博士がつくったシカゴ・パイル1号炉と同じ構造をしており、一九四六年一二月二五日に初臨界に達した。同炉は現在も稼働している。

IV-2　セミパラチンスク21　（P219）

旧ソ連の核兵器開発を行う都市は、スパイの侵入、破壊工作等を防ぐため外界から隔離されるとともに、番号を付けたコード名で呼ばれていた。セミパラチンスク21はそのコード名で、現カザフスタン共和国セミパラチンスク市の西北西約一二五キロメートルに位置し、核兵器製造関係施設があった。またこの近くにセミパラチンスク核実験サイトがあり、旧ソ連最初の原爆実験が一九四九年八月二九日にこの地で行われた。

Ⅳ-3　美浜1号炉と敦賀1号炉でのMOX燃料燃焼試験　（P241）

PWRについては関西電力美浜1号炉にMOX燃料四体を装荷し、一九八八年四月から一九九一年一二月まで三サイクル照射した。一部の燃料は東海のホットラボに送られ、照射後試験が行われた。またBWRについては日本原子力発電敦賀1号炉に、MOX燃料二体を装荷し、一九八六年六月から一九九〇年一月まで照射した。取り出されたこれらのMOX燃料は健全で、運転中の燃焼特性もウラン燃料と変わりがなく、MOX燃料を軽水炉で使用することについて問題のないことが確認された。

Ⅳ-4　不易と流行　（P256）

松尾芭蕉の俳諧用語。

「蕉門正風の俳道に志あらん人は、世上の得失是非に迷はず、烏鷺馬鹿の言語になづむべからず。天地を右にし、万物草木人倫の本情を忘れず、飛花落葉に遊ぶべし。其姿に遊ぶ時は、道古今に通じ、不易の理を失はずして、流行の変に渡る。しかる時は、志寛大にしてものに障らず。けふの変化を自在にし、世上に和し、人情に達すべし」と翁申給ひき。

（「山中問答」より、出典『古典俳文学体系10　蕉門俳論俳文集』）

Ⅳ-5　原子力開発利用長期計画　（P257）

原子力長計は一九五六年に策定されて以来、概ね五年毎に改定が行われてきており、第八次の原子力長計が一九九四年六月に策定された。今回の改定では、従来のものに比べ、冷戦構造の崩壊、地球環境問題への意識と国際的取り組みの高まり等原子力開発利用の背景となる内外の情勢が質的に大きな変化を遂げつつあるとの認識のもとで、わが国の原子力開発利用に関す

る明確な理念と計画を提示するとの考えの基に策定された。

Ⅳ-6　電源三法交付金　（P263）

「電源開発促進税法」、「電源開発促進対策特別会計法」、「発電用施設周辺地域整備法」からなる電源三法は、地域住民の福祉の向上と発電用施設の設置の円滑化を目的として制定され、一九七四年に施行された。電気事業者の販売電気に税金を課し、その税収を財源として様々の交付金や補助金が出されるが、代表的なものが「電源立地促進対策交付金」で、地方公共団体に対し、公共用施設の整備費用に充てるため交付される。一九七四年度から一九九二年度のこの交付金の交付実績は四〇三四億円である。

Ⅳ-7　若狭湾エネルギー研究センター　（P271）

若狭湾地域は多様な原子力発電施設が集積し、エネルギーに関連する様々な科学技術やこれを支える人材が蓄積している。これを地域特性として活用し、研究や交流等の拠点とすることによって地域振興を図ろうとするのがアトムポリス構想であり、これを具体化したのが若狭湾エネルギー研究センターで、一九九四年九月に設立された。研究センターの事業は研究、研修、交流の三つを柱とし、研究テーマとしては、「エネルギーの有効利用に関する研究」、「安全科学に関する研究」、「先端科学に関する研究」の三分野が考えられている。施設の建設が敦賀市で進められており、一九九八年完成の予定である。

参考文献

・原子力開発利用長期計画　原子力委員会
（日本原子力産業会議「原子力ポケットブック1995年版」）

・エネルギー研究センター基本計画　福井県エネルギー研究センター基本策定委員会

・21世紀社会と原子力文明-宇宙エネルギーをつくる
藤家洋一著〔㈳日本電気協会新聞部〕

・Proceeding of International Symposium on Global Environment and Nuclear Energy Systems, Susono, Oct, 23-28, 1994.
[Progress in Nuclear Energy 29 (Supplement)]

おわりに

原子力が言葉として社会に登場したのは一九五〇年代中頃であった。原子力時代の到来を感じて大学院で原子力を専攻した。爾来、原子力の世界で育てられ、生きてきたと認識している。当初、夢と可能性はあったものの果たして実用化時期が迎えられるかについては議論のあるところだったが、原子力は十分に魅力のある分野であり続け、そこに生甲斐を感じてきた。この間、原子力は発電を中心に科学から技術へと発展し、更に実用化へと向かった。この動きを捉え、時代とともに生きることができた人々は幸せだったと言えるのではないか。

二度にわたる石油危機は原子力発電の実用化を促進し、多くの原子力発電所が建設・運転されてきた。しかしそれ以外の分野はこの風に十分フォローできなかったようだ。

確かに、原子力発電は実用化され、原子力時代の到来はあったが、世論が原子力を先進科学技術としてテーゼ中心に見る時代は長続きせず、現実に現れたアンバランスを中心に論議するようになり、長期展望を確認しない中でアンチテーゼ先行型のものとなっていった。このことは原子力を広い視野から見ることを筆者に教えた。技術者が技術論だけで論ずるには原子力は大き過ぎる。原子力の幅の広さと奥行きの深さを考えたとき、すべてが一気に進むと考える方がむしろ楽観的に過ぎると言えるのではないだろうか。

文明の転換が無反省かつ直線的に進む筈がないのは当然なのかもしれない。そして原子力開発もこうした大きな観点から捉え直す時期に来ているのかもしれない。それは原子力の可能性を更に広げ、人類社会との関係で正に文明論的論議を進めてくれることになろう。

これまで数十年の間に多くのことが変化した。その都度考えてきたことを研究者としての生活が終りに近づいたいま、素直にまとめてみるのも大切だと思うようになった。

筆者は原子力の中でも主に安全の分野で育ててもらったと認識している。国の安全規制に関わりを持つ一方、広く社会の中で安全だけを切り離して原子力を論ずることの難しさを身にしみて感じた。安全を教条主義的に捉えるのも賛成できないし、経済性を損なうものだとする論にももちろん、くみしない。「利用から調和へ」「自ら整合性ある原子力システム」「ゼロ・リリースの原則」等の考え方は安全最優先の原子力開発の中で原子力を総体として見ることから生まれてきたように思える。

また、原子力を専攻したためか、アカデミアにいながら社会の多くの分野の方々と知己になり、友好を温めることができた。電力、メーカー、役所、大学等多くの人々との交際は彼等がいかに真面目に原子力に取り組んでいるかを教えてくれた。原子力の「正論」の部分であり、総合科学技術としての原子力を育てる源泉であろう。立地に関連して地元のオピニオンリーダー、漁協の人々、地方自治体の関係者との交際は「地方が原子力を見る時代」の考え方を学ば

せてくれた。また、立場が違って批判的な考え方の人々とも知己を得ることができた。この人達とは多くの場合お互いを意識しながら垣根越しのキャッチボールをしてきたようにも思うが、次第に垣根の必要性がなくなってきたようにも思える。それだけ原子力をめぐる論議も熟成したものと喜んでいる。「不安のない原子力を求めて」は原子力を予断を加えないで見ることの重要さを示した。

「プルトニウムをめぐる諸課題」についてはこれを核拡散防止の立場から見る上では原子力に肯定的な人も否定的な人も大差はない。しかし、このために平和目的の原子力まで否定することにはならないと考えている。「プルトニウムの象徴性と現実」は平和利用の条件を示した。

文化と文明の明確な違いも不十分な筆者にとっていわゆる文化人や評論家との討論はいらつくこともあったが、多くのことが新鮮だった。そこでは真面目さを全面に出した技術論だけでは原子力がひとりよがりで理解されないことを教えられた。「原子力の文明論的考察」はこの中で生まれた主張でもある。原子力を文明論的に捉えるなら文明を支える因子を定義するのと同時に石油文明との違いを明確にすることが必要であった。

本書の中味や表現はいささか硬く、内容的にも難しさを含んでいる。それは本書が原子力の啓蒙ではなく一つの主張だからである。せめて図や表は親しみのあるものにしたいと考え多くの人々のご協力をいただいた。鈴木聖夫さん、中川慎一さん、また東工大の若手研究者の人々

に大変なことをお願いした。おもしろい図や表もいくつかできたが、あまりやさしくはならなかった。また、中村重勝さん、久米俊哉さん、湯上道子さんには構成、校正等でお世話になった。ここに記して御礼を申し上げる次第です。

一九九五年爽秋

藤家洋一

藤家　洋一　（ふじいえ・よういち）

1935年生まれ

1958年、東京大学理学部物理学科卒業

1963年、東京大学大学院数物系研究科博士課程修了

1968年、大阪大学工学部原子力工学科助教授

1980年、名古屋大学プラズマ研究所教授

1986年、東京工業大学原子炉工学研究所教授

1989年、東京工業大学原子炉工学研究所長　　現在に至る

1995年、原子力委員　　現在に至る

〈主な著書〉

原子力「核エネルギーの解放とその利用」（関西原子力懇談会）

原子力発電「そのしくみと安全性」（社会経済国民会議）

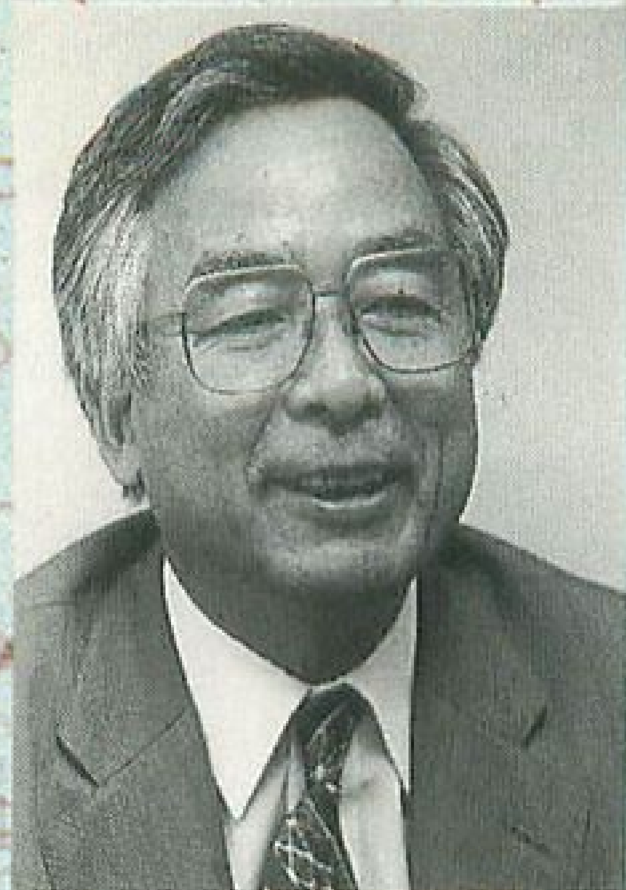
21世紀社会と原子力文明（日本電気協会新聞部）

原子力－総合科学技術への道

平成７年10月16日初版発行　定価1,950円（本体1,893円）

著　者	藤家　洋一
発行者	江口　　良
発行所	㈳日本電気協会新聞部 電気新聞　事業開発局 〒100 東京都千代田区有楽町1-7-1 ☎03-3211-1555
印刷・製本	共同印刷㈱

ISBN4−930986−30−3 C1040 P1950E



藤家洋一

（ふじいえ・よういち）

1935年生まれ
1958年　東京大学理学部物理学科卒業
1963年　東京大学大学院数物系研究科博士課程修了
1968年　大阪大学工学部原子力工学科助教授
1980年　名古屋大学プラズマ研究所教授
1986年　東京工業大学原子炉工学研究所教授
1989年　東京工業大学原子炉工学研究所長　現在に至る
1995年　原子力委員　　現在に至る

装丁:田澤祥子

ISBN4-930986-30-3 C1040 P1950E

定価1950円(本体1893円)